

Máster en Ingeniería Acústica de la Edificación y Medio Ambiente

Trabajo Fin de Máster		
Título	Determinación de las características acústicas de materiales de construcción de Ecuador - Ladrillo artesanal e industrial	
Autor	Andrea del Carmen Mena Moreno	VºBº
Tutor	Antonio Pedrero Gonzáles	
Ponente		
Tribunal		
Presidente	Constantino Gil Gonzáles	
Secretario	David Caballol Bartolomé	
Vocal	Juan Sancho Gil	
Fecha de lectura		
Calificación		

El Secretario:

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de
Telecomunicaciones



Determinación de las características acústicas de
materiales de construcción de Ecuador - Ladrillo artesanal
e industrial

Trabajo de Fin de Master

Master Universitario en Ingeniería Acústica de la Edificación y
Medio Ambiente.

Andrea del Carmen Mena Moreno

Julio 2015

Índice

Índice	I
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XVII
Índice de ecuaciones	XXI
Agradecimientos	XXV
Resumen	XXVII
Summary	XXIX
1 Objetivos	1
1.1. Objetivo general.	3
1.2. Objetivos específicos.	3
2 Introducción	5
2.1. EL ladrillo	7
2.1.1. Geometría.	7
2.1.2. Tipos de Ladrillo	8
2.1.2.1. Por su forma	8
2.1.2.2. Por su material de fabricación	12
2.1.3. Por su método de fabricación	13
2.1.4. Por su uso	14
2.2. Técnicas constructivas	14
2.3. Técnicas de acabado	17

2.4. Ladrillo en Ecuador	17
2.4.1. Normativa	19
2.4.2. Ladrillo artesanal	24
2.4.2.1. Proceso artesanal de producción	24
2.4.3. Ladrillo industrial	30
2.4.3.1. Proceso industrial de fabricación	31
3 Metodología y Procedimientos	35
3.1. Protocolo de adquisición y transporte de las muestras.	37
3.2. Dimensiones y densidad	37
3.2.1. Equipamiento	37
3.2.2. Método para determinar las dimensiones de las muestras.	39
3.2.3. Método de cálculo de la densidad y masa por unidad de superficie	41
3.3. Conductividad térmica	42
3.3.1. Equipamiento	42
3.3.2. Principio	43
3.3.3. Requisitos para la medición	44
3.3.4. Método de ensayo	46
3.3.4.1. Preparativos	46
3.3.4.2. Procedimiento de medición	47
3.4. Coeficiente de absorción acústica	54
3.4.1. Sonda de impedancia	56

3.4.1.1. Equipamiento	56
3.4.1.2. Principio	58
3.4.1.3. Requisitos para la medición	60
3.4.1.4. Método de ensayo	60
3.4.2. Tubo de impedancia	68
3.4.2.1. Equipamiento	68
3.4.2.2. Principio	72
3.4.2.3. Requisitos para la medición	73
3.4.2.4. Método de ensayo	79
3.5. Cálculo teórico del aislamiento acústico	94
3.5.1. Definiciones	94
3.5.2. Cálculo del Índice de Reducción Acústica R	95
3.5.3. Aproximación al índice global de reducción acústica	101
3.6. Evaluación De la incertidumbre	101
3.6.1. Método de evaluación de la incertidumbre	102
3.6.1.1. Modelo de la medida	102
3.6.1.1. Estimación de la incertidumbre para las magnitudes de entrada	102
3.6.1.1. Incertidumbre combinada	104
3.6.1.1. Incertidumbre expandida	105
4 Resultados	107
4.1. Recepción de las muestras	109

4.2. Dimensiones y densidad	110
4.2.1. Dimensiones y cálculo del volumen	110
4.2.2. Peso, cálculo de la densidad y de la masa por unidad de superficie	113
4.3. Coeficiente de transmisión térmica y Resistencia térmica	117
4.4. Coeficiente de absorción acústica	121
4.4.1. Método de sonda de impedancia	121
4.4.1.1. Resultados Mediciones	122
4.4.1.2. Influencia de la distancia de medición	128
4.4.1.3. Influencia del tamaño de la muestra	133
4.4.1.4. Influencia del material que rodea a la muestra	134
4.4.2. Método de tubo de impedancia	135
4.4.2.1. Resultados Ladrillo artesanal	139
4.4.2.1. Resultados Ladrillo Industrial	141
4.5. Calculo teórico del aislamiento	142
4.5.1. Resultados Cálculo del aislamiento	144
4.5.1.1. Ladrillo Artesanal	144
4.5.1.1. Ladrillo Industrial	147
4.5.1.1. Índice de reducción sonora global R_A	148
4.6. Calculo de incertidumbre	149
4.6.1. Incertidumbre dimensiones	149
4.6.2. Incertidumbre peso	150
4.6.3. Incertidumbre Volumen	150

4.6.4. Incertidumbre densidad	151
4.6.5. Incertidumbre Masa por unidad de superficie	152
4.6.6. Coeficiente de absorción	153
4.6.6.1. Ladrillo Artesanal	154
4.7. Análisis comparativo	156
4.7.1. Tubo de impedancia vs sonda de impedancia	156
4.7.2. Ladrillo artesanal vs ladrillo industrial	160
4.7.2.1. Densidad	160
4.7.2.2. Resistencia térmica	161
4.7.2.3. Coeficiente de absorción	162
4.7.2.1. Índice de Reducción sonora	163
5 Conclusiones	169
5.1. Conclusiones	171
6 Referencias	173
6.2. Referencias bibliográficas	175
Anexos	179
Anexo 1	181
Otros parámetros obtenidos	181
Anexo 2	187
Coeficiente de absorción acústica en todo el rango de frecuencia	187

Índice de figuras

Figura 2.1-1 Nomenclatura de las caras y aristas de un ladrillo	8
Figura 2.1-2 Ladrillo perforado	8
Figura 2.1-3. Ladrillo macizo	9
Figura 2.1-4. Ladrillo tejar o manual	9
Figura 2.1-5. Ladrillo aplantillado	9
Figura 2.1-6. Ladrillo rasilla	10
Figura 2.1-7. Ladrillo hueco simple	10
Figura 2.1-8. Ladrillo hueco doble	11
Figura 2.1-9. Ladrillo hueco triple	11
Figura 2.1-10. Ladrillo cara vista	11
Figura 2.1-11. Ladrillo aligerado	12
Figura 2.1-12. Ejemplos de ladrillos aligerados con escorias	12
Figura 2.1-13. Ladrillos cerámicos	12
Figura 2.1-14. Ladrillo vidriado	13
Figura 2.1-15. Ladrillo refractario (de arcilla)	13
Figura 2.2-1. Aparejo a sogas	15
Figura 2.2-2. Aparejo a tizones	15
Figura 2.2-3. Aparejo inglés	15
Figura 2.2-4. Aparejo panderete	16
Figura 2.2-5. Aparejo palomero	16

Figura 2.4-1. Depósito de arcilla negra	18
Figura 2.4-2. Depósito de arcilla lastre	19
Figura 2.4-3 Dimensiones Norma INEN 293	20
Figura 2.4-4. Noque ladrillera Susudel – Ecuador	25
Figura 2.4-5. Proceso de secado fase 1 ladrillera Susudel – Ecuador	26
Figura 2.4-6. Proceso de raspado ladrillera Susudel – Ecuador	26
Figura 2.4-7. Apilamiento para secado fase 2 Ladrillera Susudel – Ecuador	27
Figura 2.4-8. Colocación en el horno Ladrillera Susudel – Ecuador	28
Figura 2.4-9. Disposición de los ladrillos en el horno	28
Figura 2.4-10. Vista del interior del horno	29
Figura 2.4-11. Vista de boca de alimentación	29
Figura 2.4-12. Ladrillos recién horneados	30
Figura 2.4-13. Folleto informativo de la fábrica Terraforte - Ecuador	30
Figura 2.4-14. Molinos primario y secundario	32
Figura 2.4-15. Mescladora	32
Figura 2.4-16. Maquina extrusora	33
Figura 2.4-17. Cortador	33
Figura 2.4-18. Horno hecho con ladrillo refractario	34
Figura 2.4-19. Ladrillos listos para la comercialización - Fabrica Terraforte	34
Figura 3.2-1. Calibre digital	38

Figura 3.2-2. Flexómetro	38
Figura 3.2-3. Regla	38
Figura 3.2-4. Balanza digital	39
Figura 3.2-5. Designación de superficies	39
Figura 3.2-6. Esquema de medición – Tabla	40
Figura 3.2-7. Esquema de medición – Testa	40
Figura 3.2-8. Esquema de medición – Canto	40
Figura 3.3-1. Unidad medidora de Flujo de calor	43
Figura 3.3-2. Abriendo la puerta de la unidad medidora	47
Figura 3.3-3. Colocando la muestra en la unidad medidora de flujo	47
Figura 3.3-4. Operando los controles de la placa superior	48
Figura 3.3-5. Cerrando la puerta frontal	48
Figura 3.3-6. Pantalla inicial	49
Figura 3.3-7 Selección tipo de ensayo	49
Figura 3.3-8 Configuración del rango de temperatura	50
Figura 3.3-9 Ingreso de datos de grosor y densidad	51
Figura 3.3-10 iniciando la medición	51
Figura 3.3-11 Menú principal - Unidad medidora de calor	52
Figura 3.3-12 Pantalla de datos - movimiento plato superior	52
Figura 3.3-13 Ingreso al menú de configuración de la medición	53
Figura 3.3-14 Pantalla para el ingreso de datos de la muestra	53

Figura 3.3-15 Pantalla para el ingreso de temperatura para la medición	53
Figura 3.3-16 Menú para iniciar la medición	54
Figura 3.4-1 Distribución de la energía de una onda incidente en un solido	54
Figura 3.4-2 Conjunto soporte+sonda+altavoz	57
Figura 3.4-3 Acondicionador de señal	57
Figura 3.4-4 Tarjeta de audio	58
Figura 3.4-5 Computador	58
Figura 3.4-6 Imagen microscópica de un sensor microflow	59
Figura 3.4-7 Muestra rodeada de material absorbente	61
Figura 3.4-8 Muestra rodeada de material reflectante	61
Figura 3.4-9 Montaje sonda - Altavoz	62
Figura 3.4-10 Sistema montado	62
Figura 3.4-11 Esquema de conexiones paneles frontales	63
Figura 3.4-12 Esquema de conexiones panel posterior	63
Figura 3.4-13 Configuraciones globales	64
Figura 3.4-14 Configuraciones de adquisición de datos	64
Figura 3.4-15 Coeficientes de calibración	65
Figura 3.4-16 Configuración de calibración	66
Figura 3.4-17 Asignación del archivo de calibración	66
Figura 3.4-18 Configuración de medición	66

Figura 3.4-19 Configuración del análisis de medida	67
Figura 3.4-20 Parámetros analizados	67
Figura 3.4-21 Opciones de análisis de mediciones	68
Figura 3.4-22 Criterios de análisis	68
Figura 3.4-23 Tubo de impedancia con su adaptador para alta frecuencia y baja frecuencia	69
Figura 3.4-24 Pareja de micrófonos pareados	69
Figura 3.4-25 Amplificador	70
Figura 3.4-26 Computador	70
Figura 3.4-27 Pulse	71
Figura 3.4-28 Herramientas de corte	71
Figura 3.4-29 Montajes típicos de los micrófonos	76
Figura 3.4-30 Posiciones de micrófonos y distancias	76
Figura 3.4-31 Conexiones recomendadas por la norma	80
Figura 3.4-32 Muestras cortadas	81
Figura 3.4-33 Esquema de conexiones	82
Figura 3.4-34 Muestra montada	82
Figura 3.4-35 Selección del tamaño del tubo	83
Figura 3.4-36 Intervalo y tiempo de medición	84
Figura 3.4-37 Tipo de generador	84
Figura 3.4-38 Parámetros ambientales	85

Figura 3.4-39 Parámetros de advertencia	85
Figura 3.4-40 Verificación de conexiones	86
Figura 3.4-41 Activación de la plantilla	87
Figura 3.4-42 Mensaje de advertencia	87
Figura 3.4-43 Medición de ruido de fondo	88
Figura 3.4-44 Medición del nivel de la señal	88
Figura 3.4-45 Nivel de la seña vs Nivel del ruido de fondo.	89
Figura 3.4-46 Calibración - Medición con micrófonos intercambiados	89
Figura 3.4-47 Calibración - Medición con micrófonos en posición original.	90
Figura 3.4-48 Proceso de medición	90
Figura 3.4-49 Ventana de listado de mediciones.	91
Figura 3.4-50 Ventana de visualización	91
Figura 3.4-51 Promediado de datos	92
Figura 3.4-52 Combinación de mediciones de alta y baja frecuencia	92
Figura 3.4-53 Extracción de datos por bandas	93
Figura 3.4-54 Exportando resultados a Excel	93
Figura 3.5-1 Índice de reducción acústica vs Frecuencias	96
Figura 4.1-1 Set de muestras	109
Figura 4.1-2 Muestra de ladrillo extra	110
Figura 4.2-1 Pesado de muestra	114

Figura 4.3-1 Ladrillo con sus superficies aplanadas	117
Figura 4.3-2 Evaluación de la transmisión térmica – Ladrillo artesanal	117
Figura 4.3-3 Diferencia de calidad - Ladrillo artesanal	118
Figura 4.3-4 Diferencia de calidad - Ladrillo industrial	120
Figura 4.4-1 Esquema de mediciones para técnica de sonda de impedancia	122
Figura 4.4-2 Ladrillo artesanal 01 - Lana de vidrio - Sonda de impedancia	122
Figura 4.4-3 Resultados sonda de impedancia - Lana de vidrio - Sonda de impedancia.	123
Figura 4.4-4 Ladrillo artesanal 04 - Sonda de impedancia	125
Figura 4.4-5 Ladrillo Industrial 01 - Lana de vidrio - Sonda de impedancia	126
Figura 4.4-6 Ladrillo Industrial 01 - Placas reflectantes - Sonda de impedancia	127
Figura 4.4-7 Ladrillo artesanal 01 - Comparación distancias	129
Figura 4.4-8 Ladrillo artesanal 02 - Comparación distancias	130
Figura 4.4-9 Ladrillo artesanal 04 - Comparación distancias	131
Figura 4.4-10 Ladrillo industrial 01 - Comparación distancias	132
Figura 4.4-11 Coeficiente de absorción según tamaño de la muestra	133
Figura 4.4-12 Coeficiente de absorción según el material que rodea a la muestra	135

Figura 4.4-13 Ladrillo Artesanal – piezas grandes	136
Figura 4.4-14 Ladrillo artesanal - piezas pequeñas	136
Figura 4.4-15 Anomalías Ladrillo industrial 01	137
Figura 4.4-16 Ladrillo industrial 01 - pieza grande	137
Figura 4.4-17 Ladrillo industrial 01 - Pieza pequeña	137
Figura 4.4-18 Ladrillo industrial - Comparativa diámetro piezas pequeñas	138
Figura 4.4-19 Ladrillo industrial 02 – Piezas	138
Figura 4.4-20 Comparación coeficiente de absorción - Ladrillo artesanal	140
Figura 4.4-21 Coeficiente de absorción promedio - Ladrillo artesanal	140
Figura 4.4-22 Comparación coeficiente de absorción - Ladrillo industrial	142
Figura 4.5-1 Resultados: Ladrillo artesanal – 1 pie – Frecuencia critica 189 [Hz]	145
Figura 4.5-2 Resultados: Ladrillo artesanal – 1/2 pie – Frecuencia critica 311 [Hz]	146
Figura 4.5-3 Resultados: Ladrillo industrial – 1 pie – Frecuencia critica 231 [Hz]	147
Figura 4.5-4 Resultados: Ladrillo industrial – 1/2 pie – Frecuencia critica 566 [Hz]	148
Figura 4.7-1 Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal 01	157

Figura 4.7-2 Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal 02	158
Figura 4.7-3 Comparativa método de medición - Ladrillo Industrial 01	160
Figura 4.7-4 Comparativa coeficiente de absorción por tipo de muestra	162
Figura 4.7-5 Comparativa coeficiente de absorción	163
Figura 4.7-6 Índice de reducción sonora - Ladrillo artesanal por tipo de aparejo	164
Figura 4.7-7 Índice de reducción sonora - Ladrillo industrial por tipo de aparejo	165
Figura 4.7-8 Índice de reducción sonora - Ladrillo 1 pie	166
Figura 4.7-9 Índice de reducción sonora - Ladrillo 1/2 pie	167

Índice de tablas

Tabla 2.4-1 Dimensiones Ladrillo cerámicos [cm]	20
Tabla 2.4-2 Dimensiones modulares para ladrillos cerámicos	21
Tabla 2.4-3 Serie de dimensiones para ladrillo cerámico	21
Tabla 2.4-4 Requisitos técnicos ladrillo cerámico	23
Tabla 2.4-5 Dimensiones del ladrillo refractario normal o fundamental	23
Tabla 2.4-6 Dimensiones para ladrillo refractario recto	23
Tabla 3.4-1 Parámetros proporcionados por el fabricante	65
Tabla 3.6-1 Nivel de confianza y factor de cobertura	103
Tabla 4.2-1 Resultados - Dimensiones ladrillo artesanal 01 - Mitad 1	111
Tabla 4.2-2 Resultados - Dimensiones ladrillo artesanal 01 - Mitad 2	111
Tabla 4.2-3 Resultados - Dimensiones ladrillo artesanal 02	111
Tabla 4.2-4 Resultados - Dimensiones ladrillo artesanal 03	112
Tabla 4.2-5 Resultados - Dimensiones ladrillo industrial 01	112
Tabla 4.2-6 Resultados - Dimensiones ladrillo industrial 02	112
Tabla 4.2-7 Resultados Dimensiones y volumen	113
Tabla 4.2-8 Resultados - Volumen, peso y densidad - Ladrillo artesanal	114
Tabla 4.2-9 Resultados - Volumen, peso y densidad - Ladrillo industrial	114
Tabla 4.2-10 Densidad para fábrica de ladrillo cerámico macizo – CTE	115
Tabla 4.2-11 Resultados - Densidad pared de ladrillo artesanal	115
Tabla 4.2-12 Resultados - Densidad pared de ladrillo industrial	115

Tabla 4.2-13 Resultados - Masa por unidad de superficie – Ladrillo artesanal	116
Tabla 4.2-14 Resultados - Masa superficial - Ladrillo industrial	116
Tabla 4.3-1 Resultados Conductividad térmica - Ladrillo artesanal	118
Tabla 4.3-2 Resistencia térmica - Ladrillo artesanal	119
Tabla 4.3-3 Conductividad térmica - Ladrillo industrial	120
Tabla 4.3-4 Resistencia térmica - Ladrillo industrial	121
Tabla 4.4-1 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo Artesanal 01	123
Tabla 4.4-2 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo artesanal 02 d=0.5 [cm]	124
Tabla 4.4-3 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo artesanal 02 d=1 [cm]	124
Tabla 4.4-4 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo artesanal 04	125
Tabla 4.4-5 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo industrial 01 d=0.5 [cm]	126
Tabla 4.4-6 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo industrial 01 d=1 [cm]	127
Tabla 4.4-7 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo industrial 01 d=1 [cm] con placas reflectantes	128
Tabla 4.4-8 Ladrillo artesanal 01 - Comparación distancias	129
Tabla 4.4-9 Ladrillo artesanal 02 - Comparación distancias	130
Tabla 4.4-10 Ladrillo artesanal 04 - Comparación distancias	131
Tabla 4.4-11 Ladrillo industrial 01 - Comparación distancias	132
Tabla 4.4-12 Coeficiente de absorción según tamaño de la muestra	133

Tabla 4.4-13 Coeficiente de absorción según el material que rodea a la muestra	134
Tabla 4.4-14 Resultados coeficiente de absorción - Ladrillo Artesanal	139
Tabla 4.4-15 Resultados coeficiente de absorción - Ladrillo industrial	141
Tabla 4.5-1 Frecuencia critica	144
Tabla 4.5-2 Resultados: Ladrillo artesanal – 1 pie – Frecuencia critica 189 [Hz]	145
Tabla 4.5-3 Resultados: Ladrillo artesanal – 1/2 pie – Frecuencia critica 311 [Hz]	146
Tabla 4.5-4 Resultados: Ladrillo industrial – 1 pie – Frecuencia critica 231 [Hz]	147
Tabla 4.5-5 Resultados: Ladrillo industrial – 1/2 pie – Frecuencia critica 566 [Hz]	148
Tabla 4.5-6 Resultados: Índice de reducción sonora global R_A	149
Tabla 4.6-1 Incertidumbre dimensiones	150
Tabla 4.6-2 Incertidumbre Peso	150
Tabla 4.6-3 Incertidumbre Volumen	151
Tabla 4.6-4 Incertidumbre típica para la densidad de cada muestra	152
Tabla 4.6-5 Incertidumbre de la Densidad	152
Tabla 4.6-6 Incertidumbre típica para la masa por unidad de superficie de cada muestra	153
Tabla 4.6-7 Incertidumbre de la masa por unida de superficie	153
Tabla 4.6-8 Reproducibilidad de intercomparación	154
Tabla 4.6-9 Incertidumbre tipo B para el ladrillo artesanal	155

Tabla 4.6-10 Incertidumbre Ladrillo Artesanal	156
Tabla 4.7-1 Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal 01	157
Tabla 4.7-2 Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal 02	158
Tabla 4.7-3 Figura 4.7 3 Comparativa método de medición - Ladrillo Industrial 01	159
Tabla 4.7-4 Densidad muestras	161
Tabla 4.7-5 Valores de densidad Catalogo de elementos constructivos	161
Tabla 4.7-6 Comparativa resistencia térmica	161
Tabla 4.7-7 Comparativa coeficiente de absorción por tipo de muestra	162
Tabla 4.7-8 Comparativa coeficiente de absorción	163
Tabla 4.7-9 Índice de reducción sonora - Ladrillo artesanal por tipo de aparejo	164
Tabla 4.7-10 Índice de reducción sonora - Ladrillo industrial por tipo de aparejo	165
Tabla 4.7-11 Índice de reducción sonora - Ladrillo 1 pie	166
Tabla 4.7-12 Índice de reducción sonora - Ladrillo 1 pie	167

Índice de ecuaciones

(2.4-1) Proporción dimensiones ladrillo	21
(3.2-1) Promedio	41
(3.2-2) Volumen	41
(3.2-3) Densidad	41
(3.2-4) Arista de un cubo	41
(3.4-1) Coeficiente de reflexión acústica	55
(3.4-2) Coeficiente de absorción acústica	55
(3.4-3) Relación entre el coeficiente de absorción y el de reflexión acústica	55
(3.4-4) Intervalo de frecuencia de trabajo	74
(3.4-5) Frecuencia mínima de trabajo para tubos de sección circular	74
(3.4-6) Frecuencia mínima de trabajo para tubos de sección rectangular	75
(3.4-7) Distancia entre micrófonos	75
(3.5-1) Coeficiente de transmisión acústica	94
(3.5-2) Coeficiente de transmisión acústica en función del ángulo de incidencia	94
(3.5-3) Índice de reducción acústica	95
(3.5-4) Frecuencia natural	96
(3.5-5) Índice de reducción acústica para frecuencias por debajo de la frecuencia natural	96
(3.5-6) Modos propios	97
(3.5-7) Índice de reducción acústica para incidencia normal	98

(3.5-8) Aproximación del índice de reducción acústica para incidencia normal	98
(3.5-9) Índice de reducción acústica para incidencia aleatoria	98
(3.5-10) Aproximación del índice de reducción acústica para incidencia aleatoria	98
(3.5-11) Índice de reducción acústica para incidencia de campo	98
(3.5-12) Frecuencia crítica	99
(3.5-13) Frecuencia de coincidencia en función del ángulo de incidencia	99
(3.5-14) Índice de reducción acústica en la banda donde se encuentra la frecuencia crítica	99
(3.5-15) Límite superior para bandas de tercio de octava	100
(3.5-16) Límite inferior para bandas de tercio de octava	100
(3.5-17) Índice de reducción acústica por sobre la frecuencia crítica	100
(3.5-18) Índice global de reducción acústica para $m < 150$ [kg/m ³]	101
(3.5-19) Índice global de reducción acústica para $m > 150$ [kg/m ³]	101
(3.6-1) Mensurando en función de las magnitudes de entrada	102
(3.6-2) Media aritmética del conjunto de medidas	103
(3.6-3) Desviación típica de la media	103
(3.6-4) Incertidumbre típica – conociendo la incertidumbre expandida	103
(3.6-5) Incertidumbre típica – conociendo límites de variación	104
(3.6-6) Incertidumbre típica – conociendo incertidumbre de la reproducibilidad de una intercomparación	104
(3.6-7) Ley de propagación de incertidumbres	104

(3.6-8) Coeficiente de sensibilidad	104
(3.6-9) Covarianza para magnitudes correlacionadas	105
(3.6-10) Incertidumbre expandida	105
(4.6-1) Derivada parcial del volumen respecto al largo	151
(4.6-2) Derivada parcial del volumen respecto al ancho	151
(4.6-3) Derivada parcial del volumen respecto a la altura	151
(4.6-4) Derivada parcial de la densidad respecto al peso	151
(4.6-5) Derivada parcial de la densidad respecto al volumen	152
(4.6-6) Derivada parcial del promedio	152
(4.6-7) Masa por unidad de superficie	152
(4.6-8) Derivada parcial de la masa por unidad de superficie respecto a la densidad	153
(4.6-9) Derivada parcial de la masa por unidad de superficie respecto al volumen	153

Agradecimientos

Al gobierno de la República del Ecuador por hacer posible este logro a través de la Secretaría de Educación Superior Ciencia, Tecnología e Innovación con su programa de becas Convocatoria abierta 2013.



También a mi familia, amigos, colaboradores, María Ángeles, y a mi tutor Antonio por el apoyo y paciencia.

Un agradecimiento especial a Edison Paredes quien ha sido mi contacto en Ecuador para realizar la adquisición y envió de las muestras.

Resumen

En el presente trabajo se plantea el estudio de las características acústicas del ladrillo artesanal e industrial fabricado en Ecuador, considerando las características particulares respecto a la calidad de la materia prima, además del hecho de que a nivel artesanal su producción no está regularizada, si bien existen una serie de reglamentos no siempre son acatados por el productor artesanal, lo que hace que presente propiedades particulares.

La idea principal de este trabajo es generar datos referenciales e iniciales, sobre las propiedades acústicas del ladrillo artesanal e industrial ya que en Ecuador, no existe ningún estudio de esta naturaleza sobre el tema. Además de crear los mecanismos necesarios para una posible ampliación del estudio a otros materiales propios de Ecuador que permitan generar una base de datos sobre sus propiedades acústicas.

Otro aspecto importante sobre esta investigación es el familiarizarse con el uso de técnicas de medición, manejo de equipamiento y software diverso, del manejo y comparación de normativa.

Summary

The purpose of this paper is the study of the acoustic characteristics of artisanal and industrial brick manufactured in Ecuador, considering the particular characteristics regarding the quality of raw materials, besides the fact that artisanal production level is unregulated, although there are a number of regulations are not always complied with by the artisan producer, which makes this particular properties.

The main idea of this paper is to generate reference and baseline data on the acoustic properties of artisanal and industrial brick as in Ecuador, there is no study of this nature on the subject. In addition to creating the necessary mechanisms for a possible extension of the study to other materials from Ecuador that will generate a database on its acoustic properties.

Another important aspect of this research is to get familiar with the use of measurement techniques, equipment and miscellaneous management software, management and comparison of legislation.

1

Objetivos

1.1. Objetivo general.

El objetivo principal de esta investigación es realizar una serie de ensayos que permitan determinar los valores de coeficiente de absorción y otras propiedades acústicas de algunos materiales de construcción de Ecuador, tomando como material referencial al ladrillo común artesanal para realizar un estudio comparativo respecto al ladrillo de fabricación industrial.

1.2. Objetivos específicos.

- Idear un protocolo de adquisición y transporte de las muestras, que permita traerlas desde Ecuador de forma segura y económica garantizando la integridad de la muestra.
- Aplicar los métodos de tubo de impedancia y de sonda de impedancia para evaluar el coeficiente de absorción de las muestras, y comparar su efectividad.
- Evaluar características otras características físicas de las muestras como sus dimensiones, volumen, masa, densidad y conductividad térmica.
- Realizar el cálculo teórico del aislamiento acústico aproximado.

2

Introducción

2.1. EL ladrillo

El ladrillo es una pieza cerámica cuya forma consiste en un paralelepípedo ortogonal, que se fabrica mediante la mezcla de arcilla o tierras arcillosas y agua, pasando por un proceso de secado y cocción a altas temperaturas. Son resistentes a la humedad y al calor.

Su uso está centrado en las labores de albañilería, ya que generalmente sus dimensiones permiten que sea colocado con una sola mano por parte del operario, con este se construyen muros, tabiques, etc.

El ladrillo es el material de construcción más antiguo fabricado por el hombre, ha sido usado como material de construcción desde el neolítico pre cerámico (9500 a.c.), ya que en las zonas donde los agricultores levantaron sus ciudades existía poca madera y piedra. Los sumerios y babilonios secaban los ladrillos al sol, pero para reforzar muros y murallas usaban un recubrimiento de ladrillo cocido, otras veces los recubrían con esmaltes para lograr efectos decorativos. Debido a sus características, su uso se fue extendiendo en el imperio Persa, Chino, Romano. Durante la edad media, en el imperio Bizantino y en cualquier lugar donde escaseara la piedra, el ladrillo fue bien valorado debido a sus características de funcionalidad y decorativas, siendo de uso común durante el renacimiento, llevado a América por los colonos.

Las civilizaciones prehispánicas de América ya conocían el ladrillo, en las zonas secas se construían casas, con ladrillos de adobe secados al sol sitios ceremoniales como las pirámides de los Olmecas, entre otras se construyeron con ladrillos recubiertos con piedra.

En España debido a la influencia de la cultura musulmana, el uso del ladrillo se generalizó, sobre todo en las zonas de Castilla, Aragón y Andalucía. Dando como resultado una amplia difusión de este material en las zonas colonizadas en América, como Ecuador.

En la actualidad aún sigue siendo un material de uso común, si bien la fabricación artesanal ha ido disminuyendo, esta va siendo remplazada por la industrial.

2.1.1. Geometría.

EL ladrillo tiene una forma de prisma rectangular, sus diferentes dimensiones y caras se denominan de la siguiente manera:

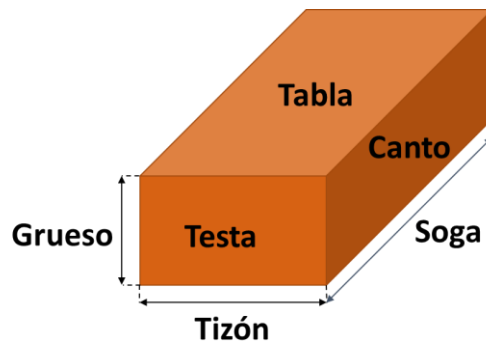


Figura 2.1-1 Nomenclatura de las caras y aristas de un ladrillo

Donde se puede considerar a la soga la dimensión de mayor tamaño, el grueso la dimensión más pequeña, generalmente la soga tiene una longitud equivalente a dos tizones más una junta, lo que permite combinarlos libremente. La tabla es la cara de mayor superficie.

Existen diferentes formatos de ladrillo, cuyo tamaño varía según su uso, pero la idea general es que su tamaño permita ser manipulados con una sola mano.

2.1.2. Tipos de Ladrillo

Existen varios criterios para clasificar los tipos de ladrillo que se fabrican, puede ser por su forma, por su uso o por la forma como han sido fabricados.

2.1.2.1. Por su forma

- Ladrillo perforado.- Tienen perforaciones en la tabla que ocupan más del 10 % de su superficie. Se utilizan en la ejecución de fachadas.



Figura 2.1-2 Ladrillo perforado¹

¹ http://www.materialesdeconstruccionmadrid.com/ladrillos/ladrillo_perforado5.jpg;
http://img.archiexpo.es/images_ae/photo-g/ladrillo-perforado-60746-2243901.jpg;
<http://www.en-obra.com.co/guia/files/classifieds/187-344.jpg>

- Ladrillo macizo.- Aquellos con menos de un 10 % de perforaciones en la tabla. Algunos modelos presentan patrones en las tablas y en las testas para ejecución de muros sin llagas.

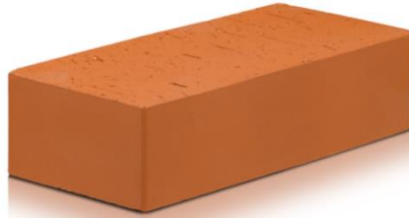


Figura 2.1-3. Ladrillo macizo²

- Ladrillo tejar o manual, simulan los ladrillos de fabricación artesanal, con apariencia tosca y caras rugosas.



Figura 2.1-4. Ladrillo tejar o manual³

- Ladrillo apantillado, aquel suele tener un perfil curvo. El nombre proviene de las plantillas que utilizaban los canteros para labrar las piedras, y que se utilizan para dar la citada forma al ladrillo.



Figura 2.1-5. Ladrillo apantillado⁴

² <http://www.valegandara.com/ES/productos/macico.php>

³ <http://mjmaterialdesdelujan.com.ar/wp-content/uploads/2013/02/Ladrillo-macizo1.png>

⁴ http://brest.all.biz/es/ladrillo-apantillado-g255772#.VW4Vis_tIBd

- Ladrillo hueco, son aquellos que poseen perforaciones en el canto o en la testa que reducen el peso y el volumen del material empleado en ellos, facilitando su corte y manejo. Aquellos que poseen orificios horizontales son utilizados para tabiquería que no vaya a soportar grandes cargas. Pueden ser de varios tipos:
 - Rasilla: su soga y tizón son mucho mayores que su grueso. En España, sus dimensiones más habituales son $24 \times 11,5 \times 2,5$ cm.



Figura 2.1-6. Ladrillo rasilla⁵

- Ladrillo hueco simple: posee una hilera de perforaciones en la testa.



Figura 2.1-7. Ladrillo hueco simple⁶

- Ladrillo hueco doble: con dos hileras de perforaciones en la testa.

⁵

http://www.generadordeprecios.info/imagenes2/ffs_hispalam_s_120_218_83363B94.jpg

⁶ http://www.ceramicasanjacinto.com/imagenes/hueco_sencillo_4.jpg



Figura 2.1-8. Ladrillo hueco doble⁷

- Ladrillo hueco triple: posee tres hileras de perforaciones en la testa.



Figura 2.1-9. Ladrillo hueco triple⁸

- Ladrillo cara vista: son aquellos que se utilizan en exteriores con un acabado especial.



Figura 2.1-10. Ladrillo cara vista⁹

⁷

<http://www.ladrillosbailen.net/imagenes/9%20Ladrillo%20Hueco%20Doble%20GF%2040x20x7.jpg>

⁸

<http://www.ladrillosbailen.net/imagenes/10%20Ladrillo%20Hueco%20Triple%20GF%2030x15x10.jpg>

⁹ <http://www.ladrilloceramico.com/ladrillo-cara-vista/ladrillo-caravista-rojo-intenso.html>

2.1.2.2. Por su material de fabricación

- Aligerado.- Se fabrica mezclando aserrín o polvo y desperdicios de conchas o maderas con tierras arcillosas y cocido después en forma ordinaria.



Figura 2.1-11. Ladrillo aligerado¹⁰

- De escorias.- Ladrillo hecho con cemento o arcilla y escorias.



Figura 2.1-12. Ejemplos de ladrillos aligerados con escorias¹¹

- Cerámico.- Es un ladrillo macizo y hueco fabricado con esmero que se fabrica moldeando mecánicamente en una maquina llamada galletera se, cocido con hornos fijos, continuos o intermitentes.

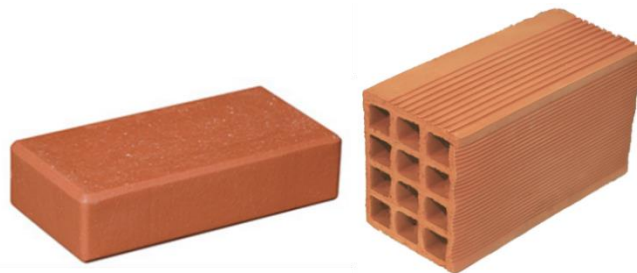


Figura 2.1-13. Ladrillos cerámicos¹²

¹⁰ <http://bolivia.incerpaz.com/wp-content/uploads/2014/04/B-Standar-aligerado1.jpg>

¹¹ http://www.agenciasinc.es/var/ezwebin_site/storage/images/noticias/ladrillos-con-residuos/1861988-1-esl-MX/Ladrillos-con-residuos_image_380.jpg

¹² <http://constructores-modern.alampa.ru/ladrillos-ceramicos/> ; http://www.malpesa.es/imagenes_adoquin/1--adoquin.jpg

- Vidriado.- Presenta en una o varias de sus superficies un revestimiento de tipo cerámico o esmaltado.



Figura 2.1-14. Ladrillo vidriado¹³

- Refractario.- El que se fabrica con materia primas especiales, para dotarlo de resistencia altas temperaturas.



Figura 2.1-15. Ladrillo refractario (de arcilla)¹⁴

2.1.3. Por su método de fabricación

- Ladrillo Artesanal.- En su proceso de fabricación se basa en el empleo intensivo de mano de obra y el uso de herramientas manuales generalmente, se emplean hornos de adobe donde se usa leña como combustible.

¹³ <http://www.ceramica-lapaloma.com/im/esmaltados/imagen-obra-ladrillo-caravista-ceramico-esmaltado-negro-brillo.jpg>

¹⁴ http://img.archiexpo.es/images_ae/photo-g/ladrillo-refractario-arcilla-68751-2954481.jpg

La calidad de estos es variable dependiendo de su posición en el horno y de la calidad de la arcilla o tierra arcillosa empleada.

- Ladrillo industrial.- En este caso si bien el método de fabricación es bastante similar cuenta con la asistencia de herramientas automatizada, además de un estudio de la calidad de la materia prima, lo que garantiza una mayor uniformidad en cuanto a sus propiedades

2.1.4. Por su uso

- De cuña.- Se utilizan para construcciones de chimeneas circulares.
- De paramento.- El fabricado con una cara por lo menos perfecta para formar el paramento de muros.
- Traba.- De longitud distinta a la usual, usado para organizar la trabazón en los arranques de muros.

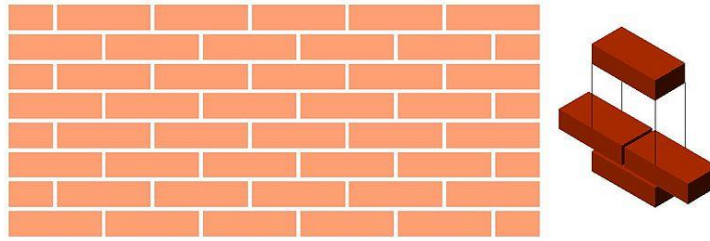
2.2. Técnicas constructivas

Los ladrillos son un tipo de material que tiene gran variedad y versatilidad, y suelen ser usados en construcción de particiones, cerramientos, fachadas.

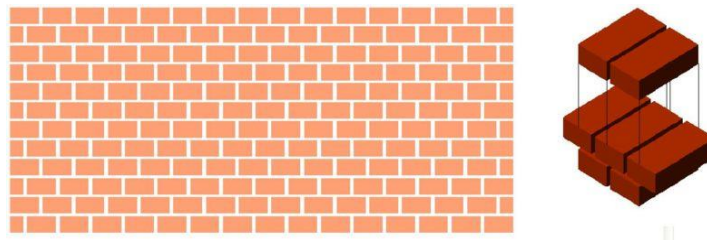
El ladrillo artesanal que es el centro de nuestro estudio y su símil en industrial, se utilizan principalmente para la construcción de paredes, muros o tabiques, para esto se juntan con la ayuda de cemento o mortero.

La forma como se disponen los ladrillos en el muro se llama aparejo, y consiste en una serie de reglas para la colocación, las dimensiones, como se harán los encuentros y la forma en que se trabaran. Existen diversos tipos de aparejo:

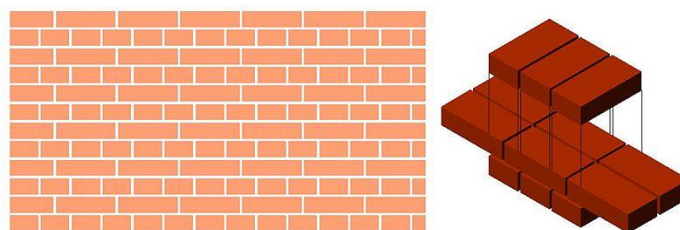
- Aparejo a sogas.- aquí los costados del muro se forman por las sogas del ladrillo, el espesor medio será la medida del el tizón, es muy utilizado para fachadas de ladrillo cara vista.

Figura 2.2-1. Aparejo a sogas¹⁵

- **Aparejo a tizones o a la española:** en este caso los tizones forman los costados del muro y su espesor la longitud de la sogá. Muy utilizado en muros que soportan cargas estructurales (portantes).

Figura 2.2-2. Aparejo a tizones¹⁶

- **Aparejo inglés:** En este se alternan hiladas en sogas y en tizones, dando un espesor de la sogá. Se emplea mucho para muros portantes en fachadas de ladrillo cara vista. Su traba es mejor que el muro a tizones pero su puesta en obra es más complicada y requiere mano de obra más experimentada.

Figura 2.2-3. Aparejo inglés¹⁷

¹⁵ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Soga.JPG>

¹⁶ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tizon.JPG>

¹⁷ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ingles.JPG>

- Aparejo en panderete: se emplea en la ejecución de tabiques, su espesor corresponde al grueso de la pieza y no está preparado para absorber cargas excepto su propio peso.

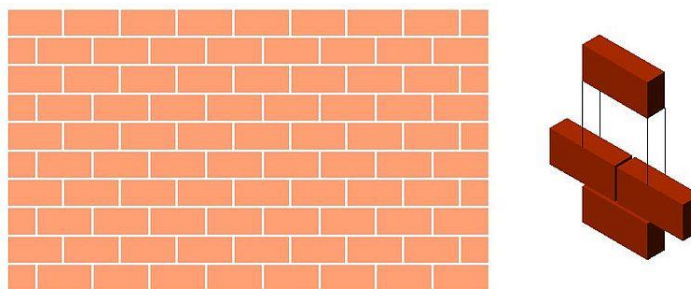


Figura 2.2-4. Aparejo panderete¹⁸

- Aparejo palomero: es similar el aparejo en panderete pero dejando huecos entre las piezas horizontales. Se emplea en aquellos tabiques provisionales que deben dejar ventilar la estancia y en un determinado tipo de estructura de cubierta.

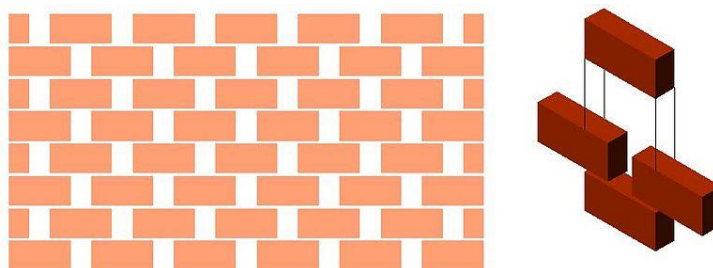


Figura 2.2-5. Aparejo palomero¹⁹

- Aparejo holandés, belga, flamenco: son otros tipos de aparejo de ladrillo más complejos, combinaciones de los de sogá, tizón, sogá y tizón, por hiladas (líneas horizontales de ladrillo) combinadas de modo regular algunos de los tipos citados, y muy usados a cara vista por su aspecto y mejor traba.

¹⁸ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panderete.JPG>

¹⁹ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Palomero.JPG>

2.3. Técnicas de acabado

Otro aspecto importante es el acabado que se le dará al ladrillo, en Ecuador los enlucidos más comunes son:

- Yeso
- cal
- Cemento y arena

También se usan de manera menos frecuente:

- Tierra y arena
- Tierra y cal
- Barro

Para este estudio en particular se omitirán los acabados, ya que la idea principal es evaluar las características acústicas básicas del ladrillo.

2.4. Ladrillo en Ecuador

El ladrillo es uno de los materiales más utilizados en la edificación de viviendas sobre todo en la parte norte de Ecuador, sin embargo debido a lo complejo y laborioso del proceso artesanal, la fabricación de estos ha ido disminuyendo con el pasar del tiempo.

Para esta investigación se ha tomado como punto central el ladrillo artesanal ya que es común encontrarse con estructuras donde se ha empleado este tipo de ladrillo, y al no existir datos o valores referenciales en Ecuador sobre sus características acústicas, se dificulta realizar una estimación apropiada para un acondicionamiento acústico.

Desde el punto de vista de la metodología de producción de ladrillo se puede dividir en artesanal e industrial, ambas ocupan técnicas similares de producción diferenciándose principalmente por el tipo de ladrillo que se produce ya que los artesanos generalmente producen ladrillos macizos de diferentes tamaños y calidades

en cambio los productores industriales ofrecen diferentes tipos de ladrillos macizos, perforados, huecos, de arcilla y cerámicos.

Los ladrillos se fabrican de arcilla o tierra arcillosa, con adición de materias áridas, de suficiente plasticidad o consistencia, para que puedan tomar forma permanente y secarse sin que se presenten grietas, nódulos o deformaciones. No deben contener material alguno que pueda causar eflorescencia o manchas en el acabado.

El proceso de producción es extenso y discontinuo, donde sobre todo para los productores artesanales, factores como el clima influyen tanto en la productividad como en la calidad del producto final.

La materia prima que se utiliza son arcilla o tierras arcillosas, cuyo tipo y calidad varían según la zona geográfica en la que se encuentra la ladrillera, generalmente los productores prefieren la arcilla negra y lastre, aunque pueden ocupar arcilla roja, amarilla o blanca según la disponibilidad de los materiales.



Figura 2.4-1. Depósito de arcilla negra²⁰

²⁰ Deleg N. "Definición de un proceso de producción semi-industrial de ladrillos en la parroquia de Susudel"



Figura 2.4-2. Depósito de arcilla lastre²¹

2.4.1. Normativa

Según la norma ecuatoriana INEN 293 – 1977 “Ladrillos cerámicos definiciones, clasificación y condiciones generales”, un ladrillo es una pieza cerámica de arcilla moldeada y cocida en forma de prisma regular que se emplea en albañilería, clasificándolo de la siguiente manera:

- Común (mambrón).- Ladrillo moldeado a mano
- De maquina.- Ladrillo moldeado mecánicamente y en producción continua.
- Prensado.- Se prensa entre el proceso de moldeo y cochura.
- Macizo.- Ladrillo fabricado a mano a máquina sin perforaciones o con perforaciones celulares que pueden llegar hasta un 20% de su volumen.
- Hueco.- Ladrillo fabricado a máquina con perforaciones que superan el 20% de su volumen.

²¹ Deleg N. “Definición de un proceso de producción semi-industrial de ladrillos en la parroquia de Susudel”

También se designan en este apartado las dimensiones:

- Largo l
- Ancho a
- Altura h

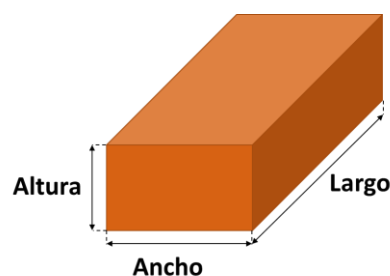


Figura 2.4-3 Dimensiones Norma INEN 293

Esta norma también establece en sus condiciones generales que la materia prima debe ser arcilla o tierra arcillosa, permitiendo adicionar materiales para mejorar la plasticidad y consistencia garantizando un adecuado secado evitando defectos como grietas, nódulos o deformaciones, se debe evitar cualquier tipo de mancha en el acabado.

En cuanto al principio de fabricación lo plantea como un proceso de cocción al rojo vivo a una temperatura de mínimo 800°C, del cual se debe obtener un producto de color rojizo, masa homogénea, resistencia uniforme, y al ser golpeado con un material duro debe emitir un sonido metálico.

En cuanto a las dimensiones y tolerancias, estas deben ser uniformes con un máximo de variación del 4%, según la siguiente tabla:

Tipo de ladrillo	Largo L	Ancho a	Alto h
Común	39	19	9
De maquina	39	19	9
	29	14	9
Reprensado	29	19	9
	29	14	9
Hueco	29	19	19
	29	19	14
	29	19	9

Tabla 2.4-1 Dimensiones Ladrillo cerámicos [cm]

De acuerdo a la norma, se pueden utilizar ladrillos con un alto de 7 cm por convenio entre proveedor y comprador. Evidentemente existen en el mercado una mayor variedad de dimensiones, y sobre todo en la producción artesanal debido a las condiciones en las que se realizan no se suelen cumplir dichos estándares respecto a las dimensiones y tolerancias.

En este apartado la norma también hace referencia a la norma INEN 317 “Coordinación modular de la construcción dimensiones modulares de ladrillos cerámicos”, para definir las posibilidades respecto a tamaños de fabricación:

Largo L		Ancho a		Alto h
2M	x	1M	x	1M
3M	x	1,5M	x	1M
4M	x	2M	x	1M
M=10[cm]				

Tabla 2.4-2 Dimensiones modulares para ladrillos cerámicos

La norma también considera la posibilidad de fabricar otros tamaños, esto se debe convenir entre el productor y el comprador, utilizando las siguientes series:

Largo	L	2M ; 3M ;5M
Ancho	a	1M,1,5M,2M
Altura	h	1M; 1,5M; 2M
M=10[cm]		

Tabla 2.4-3 Serie de dimensiones para ladrillo cerámico

Para la selección de las dimensiones se deberá respetar la siguiente relación:

$$l = 2a + s \quad (2.4-1)$$

Donde:

$l \rightarrow$ Largo

$a \rightarrow$ Ancho

$s \rightarrow$ Junta, esta debe ser menor o igual a 10 [mm].

Los requisitos técnicos se establecen en la norma INEN 297 - 1977 “Ladrillos Cerámicos Requisitos”, donde clasifica los ladrillos en macizos y huecos y los su clasifica según su calidad y uso.

Para los ladrillos cerámicos macizos, se estipulan las siguientes características fundamentales:

- Tipo A.- Ladrillo reprensado de color rojizo uniforme, con ángulos rectos y aristas rectas, no debe presentar manchas, eflorescencias, quemados ni desconchados aparentes en caras y aristas.
- Tipo B.- Ladrillo de máquina de color rojizo, al igual que en el tipo A debe tener ángulos rectos y aristas rectas, pero en este caso se toleran imperfecciones en sus caras exteriores así como variaciones en sus aristas de hasta 5mm.
- Tipo C.- Puede ser fabricado a mano, es similar al tipo B, también puede tener imperfecciones, y la variación de rectitud en sus aristas puede ser de hasta 8mm.

En el caso de los ladrillos huecos, se especifica que estos son de máquina, y se clasifican según su uso:

- Tipo D.- Podrá usarse en la construcción de muros soportantes y tabiques divisorios no soportantes y relleno de losas alivianadas de hormigón armado.
- Tipo E.- Para construcción de tabiques divisorios no soportantes y relleno de losas alivianadas de hormigón armado.
- Tipo F.- Únicamente podrá ser empleado para el relleno de losas alivianadas de hormigón armado.

Finalmente esta norma establece los requisitos de resistencia mecánica y absorción de humedad que deben cumplir los ladrillos cerámicos:

Tipo		Resistencia mínima a la compresión [MPa]		Resistencia mínima la flexión [MPa]	Absorción máxima de humedad %
		Promedio 5 unidades	Individual	Promedio 5 unidades	Promedio 5 unidades
Macizo	A	25	20	4	16
	B	16	14	3	18
	C	8	6	2	25
Hueco	D	6	5	4	16
	E	4	4	3	18
	F	3	3	2	25
Método de ensayo		INEN 294		INEN 295	INEN 296
1MPa = 10 [Kg/cm]					

Tabla 2.4-4 Requisitos técnicos ladrillo cerámico

Adicionalmente la norma INEN 607 (1981) “Materiales refractarios. Formas y dimensiones recomendadas de ladrillos y piezas de caras planas” establece criterios acerca de las dimensiones definiendo en primera instancia el ladrillo normal o fundamental:

Formato normal o fundamental	Dimensiones y tolerancias [mm]		
	Largo	Ancho	Alto
	229±5	114±3	63±2

Tabla 2.4-5 Dimensiones del ladrillo refractario normal o fundamental

A parte del ladrillo fundamental se consideran otras posibilidades de tamaños para ladrillos prismáticos rectos:

Dimensiones y tolerancias [mm]				
Tipo		Largo	Ancho	Altura
Ladrillo Recto N°	1	229 ± 5	114 ± 3	76 ± 2
	2	229 ± 5	171 ± 3	63 ± 2
	3	229 ± 5	171 ± 3	76 ± 2
	4	305 ± 6	114 ± 3	63 ± 2
	5	305 ± 6	114 ± 3	76 ± 2
	6	305 ± 6	152 ± 3	63 ± 2
	7	305 ± 6	125 ± 3	76 ± 2
	8	305 ± 6	229 ± 3	63 ± 2
	9	343 ± 7	114 ± 3	76 ± 2
	10	343 ± 7	114 ± 3	63 ± 2

Tabla 2.4-6 Dimensiones para ladrillo refractario recto

2.4.2. Ladrillo artesanal

El ladrillo artesanal, es básicamente un ladrillo macizo moldeado a mano, su dureza está definida por su posición en el horno.

Los tamaños más comunes de fabricación son:

- 30[cm] x 15[cm] x 8[cm] siendo este el tamaño estándar, cuyo peso es de aproximadamente 8 libras (3.6kg aproximadamente).
- 30[cm] x 15[cm] x 10 [cm]
- 20[cm] x15[cm] x 8[cm]

En el caso de los ladrillos artesanales, es difícil obtener datos técnicos ya que si bien la norma contempla su producción, esta no se encuentra regularizada y carece de controles de calidad formales.

2.4.2.1. Proceso artesanal de producción

La producción artesanal se caracteriza por el uso de herramienta manual, los materiales y el producto se mueven utilizando carretillas o cargándolos.

En los siguientes apartados se detallan las diferentes etapas de producción:

- Extracción de la tierra.- La tierra que constituye la materia prima de los ladrillos se extrae de las montañas, haciendo orificios profundos, de varios metros de diámetro, generalmente se utilizan herramientas manuales (azadón y pico). Para obtener una materia prima adecuada se suelen mezclar diferentes tipos de tierra extraídas a diferente profundidad hasta obtener las características necesarias de plasticidad.
- Triturado y molido de la tierra seca.- Una vez obtenida la materia prima se procede a separar manualmente de impurezas que no permiten obtener un barro adecuado como piedras, palos, vidrio, para luego ir golpeando el terreno hasta lograr una cierta uniformidad, para este trabajo generalmente se emplean caballos, burros o mulas.

El proceso de selección es uno de los más importantes ya que de este depende la calidad del producto final. Además este proceso puede tomar 1 día y medio a 2 días.

- **Mescla y amasado del barro.-** Esta operación se realiza en una especie de pozas redondas en el suelo denominadas noques, donde se mesclan las diferentes materias primas, las proporciones dependerá de la calidad de las mismas y de la experiencia del operador para lograr un buen resultado.

Para preparar el barro se utiliza agua de acequias o de pozos, que se va agregando de a poco mientras se va pisando para homogenizar la mezcla, dependiendo de la plasticidad del material se añadirán sustancias como ceniza o aserrín que cumplen la función de plastificante, se lo deja reposar dos o más días para repetir el proceso de amasado hasta que logra una consistencia adecuada, inicialmente se lo pisa con botas, pero luego se lo hace descalzo.

Este proceso transcurre sin ningún tipo de control respecto a la humedad y densidad, ya que está basado exclusivamente en la experiencia del operador.



Figura 2.4-4. Noque ladrillera Susudel – Ecuador²²

- **Moldeado de los adobes.-** Este proceso se lo hace utilizando una plataforma cuya superficie se coloca aserrín, y se emplean moldes de madera según los tamaños que se desee fabricar, y una tablilla para alisar la superficie. La idea es que los ladrillos adquieran una consistencia que permita manipularlos.

²² Deleg N. “Definición de un proceso de producción semi-industrial de ladrillos en la parroquia de Susudel”

Durante este proceso se pueden presentar variaciones en el tamaño de los ladrillos debido al sistema manual de fabricación y desgaste de los moldes y la tablilla.

- Secado.- Esta fase se compone de 2 etapas, un secado inicial que dura entre 2 y 3 días dependiendo del clima, en el lugar donde se fabricaron los ladrillos, si el lugar está a la intemperie se corre el riesgo de perder la producción en caso de lluvia.



Figura 2.4-5. Proceso de secado fase 1 ladrillera Susudel – Ecuador²³

Una vez que los ladrillos han perdido la cantidad suficiente de humedad se hace el raspado que consiste en eliminar los excesos de masa o deformaciones que tenga el ladrillo.



Figura 2.4-6. Proceso de raspado ladrillera Susudel – Ecuador²⁴

²³ Deleg N. "Definición de un proceso de producción semi-industrial de ladrillos en la parroquia de Susudel"

²⁴ Deleg N. "Definición de un proceso de producción semi-industrial de ladrillos en la parroquia de Susudel"

En la segunda etapa del secado, se mueve los ladrillos a rumas, un lugar donde serán colocados de tal manera que tengan espacio entre sí para que haya circulación de aire, si el lugar a la intemperie se suele cubrir con plástico para proteger de la lluvia, este secado dura entre 7 y 10 días, dependiendo nuevamente del clima.



Figura 2.4-7. Apilamiento para secado fase 2 Ladrillera Susudel – Ecuador²⁵

- Carga del horno.- Los hornos tienen paredes de adobe, y pueden tener una planta rectangular, cuadrada o redonda dependiendo del lugar, a veces tienen techo de teja, pero en general son a cielo abierto, y solo se tapan al final con una capa de ladrillos para que el proceso de enfriamiento sea paulatino y así evitar fisuras debido a las variaciones bruscas de temperatura. Por lo general se puede hacer una hornada al mes o quizás menos según el clima. La leña debe ser arrumada y secada previamente. Una vez que se tiene todo listo, se procede a cargar el horno en hileras, procurando una distribución que ayude a tener una distribución del calor lo más uniforme posible.

²⁵ Deleg N. “Definición de un proceso de producción semi-industrial de ladrillos en la parroquia de Susudel”



Figura 2.4-8. Colocación en el horno Ladrillera Susudel – Ecuador²⁶

- Quema y enfriamiento del horno.- La operación del horno es discontinua, del encendido se encarga el trabajador especializado, quien alimenta el fuego por las bocas inferiores de manera continua durante un periodo de 18 a 20 horas, una vez listo, se deja que este se queme solo, y se esperan 8 días hasta que este se enfrié para obtener el los ladrillos terminados.



Figura 2.4-9. Disposición de los ladrillos en el horno

²⁶ Deleg N. "Definición de un proceso de producción semi-industrial de ladrillos en la parroquia de Susudel"



Figura 2.4-10. Vista del interior del horno



Figura 2.4-11. Vista de boca de alimentación

- Descarga del horno.- Finalmente, una vez que el horno se ha enfriado, y los ladrillos están a una temperatura que permite su manipulación, se descarga el horno clasificando los ladrillos de acuerdo a su posición en el horno, ya que esta define su calidad final.



Figura 2.4-12. Ladrillos recién horneados

2.4.3. Ladrillo industrial

En la industria ecuatoriana fabrica diversos tipos de ladrillos, incluidos los que son tipo artesanal, usando una técnica similar pero con ayuda de maquinaria y un control de calidad que va desde la correcta selección de la materia prima.

Aquí se puede ver in catálogo donde se muestran algunos de los ladrillos elaborados por la fábrica Terraforte:

Ladrillo

MANPOSTERÍAS

Absorción de Humedad:
<10% aprox

Temperatura de Cocción:
1050°C aprox.

Resistencia a compresión:
> 300 Kg/cm2

DETALLES

Tipo	ESTRUCTURAL	CARA VISTA 2H	CARA VISTA 4H	CARA VISTA 8H
Tamaño	08 x 14 x 29 cm	07 x 13 x 29 cm	20 x 08 x 29 cm	14 x 20 x 29 cm
Peso	3.0 Kg	2.6 Kg	4.05 Kg	7.90 Kg
Unidades por m2	40	43	16	16

LADRILLOS HUECOS PARA MANPOSTERÍA			
Tamaño	10 x 20 x 40 cm	15 x 20 x 40 cm	15 x 20 x 40 cm
Peso	7.1 Kg	8.5 Kg	8.5 Kg
Unidades por m2	12.5	12.5	12.5
Opcionales	Liso, Rayado, Machimbrado		

Figura 2.4-13. Folleto informativo de la fábrica Terraforte - Ecuador

2.4.3.1. Proceso industrial de fabricación

El proceso de fabricación industrial sigue un procedimiento similar al artesanal, apoyado en maquinaria, contando con una infraestructura especializada, y con un control de calidad que va desde la adecuada selección de las materias primas, control de condiciones ambientales para los procesos de secado y horneado, etc.

- Selección de la materia prima y tratamiento inicial.- Mediante un estudio de la materia prima disponible en el área comprobando sus propiedades, estableciendo en el mejor de los casos mediante un análisis químico los componentes para así determinar en qué proporciones se mezclaran los diferentes tipos de arcilla o tierra arcillosa.

Una vez seleccionada la materia prima, se la traslada a un lugar dedicado específicamente para este propósito, donde se hará el proceso de maduración que consiste en dejar la arcilla reposar un tiempo que dependerá de las condiciones climáticas y la humedad inicial, para facilitar la el trabajo de desmenuzar y además favorece la descomposición de materia la orgánica presente.

En el mismo lugar se harán as mezclas pertinentes según la necesidad y características de las arcillas para lograr la calidad deseada.

- Triturado y molido.- Una vez que se ha cumplido con el tiempo de maduración de la arcilla y se ha mezclado en las proporciones deseadas, se la transporta hacia el área donde se realizara el proceso de trituración y molido de la misma.
- Este proceso tiene 2 etapas, utilizando dos molinos, en el primero se procesaran las masas de mayor tamaño, y en el segundo se procesara ahora las masas más pequeñas lo que garantizara una uniformidad del material para su posterior uso.



Figura 2.4-14. Molinos primario y secundario²⁷

- Homogenización, Mescla y amasado.- Una vez realizado el proceso de molido, la materia prima continua hasta el mezclador, donde se termina de romper cualquier nódulo o lamina existente y se homogeniza y mescla la materia prima, según el caso se puede pasar a una segunda etapa de homogenización, durante el proceso se va agregando la cantidad de agua necesaria para el proceso de extrusión.



Figura 2.4-15. Mescladora²⁸

- Extrusión y corte.- De la maquina mescladora la materia prima va directamente a la maquina extrusora, que es la encargada de dar forma a los ladrillos en base a presión mecánica, garantizando la una compactación adecuada mediante el uso de una bomba de aire. La forma del ladrillo estará dada por la boquilla ubicada a su salida, y de esta sale una bloque sin fin que pasa a la maquina cortadora, que dará las dimensiones definitivas al producto.

²⁷ Guillén H ,Semper G. “Análisis de la factibilidad para la implementación de una fábrica de ladrillos para la construcción”.

²⁸ Guillén H. Semper G. “Análisis de la factibilidad para la implementación de una fábrica de ladrillos para la construcción”.



Figura 2.4-16. Máquina extrusora²⁹



Figura 2.4-17. Cortador³⁰

- Secado.- Al igual que para el ladrillo artesanal, el secado tiene dos etapas, en la primera los ladrillos se mueven hacia una zona donde los dejara en reposo un periodo de mínimo 12 horas para permitir el reacomodamiento molecular después del proceso de extrusión. Luego se los mueve a la zona de secado, que generalmente queda junto a los hornos para aprovechar el calor residual de estos mejorando la pérdida paulatina de humedad, esto puede tomar aproximadamente 48 horas, siempre y cuando se tenga un control sobre la temperatura del lugar.
- Horneado.- Una vez que se ha secado el ladrillo se procede a colocarlos dentro del horno para el quemado final. Los hornos generalmente se

²⁹ Guillén H. Semper G. "Análisis de la factibilidad para la implementación de una fábrica de ladrillos para la construcción".

³⁰ Guillén H. ,Semper G. "Análisis de la factibilidad para la implementación de una fábrica de ladrillos para la construcción".

construyen de ladrillo refractario, en algunos casos utilizan leña, o aserrín, para garantizar la óptima combustión. Algunos hornos cuentan con un sistema que inyecta un algún tipo de combustible como diésel y aire a presión, lo que permite tener un control de la temperatura en el horno, este proceso dura unas 24 horas, luego de este tiempo, se apaga el horno, y luego con un sistema de chimenea invertida se extrae el calor residual.

Una vez que los ladrillos están a una temperatura que sea manejable, se los extrae del horno y se los lleva a bodegas para su posterior empaquetado y venta.



Figura 2.4-18. Horno hecho con ladrillo refractario³¹



Figura 2.4-19. Ladrillos listos para la comercialización - Fabrica Terraforte

³¹ Guillén H. , Semper G. “Análisis de la factibilidad para la implementación de una fábrica de ladrillos para la construcción”.

3 Metodología y Procedimientos

3.1. Protocolo de adquisición y transporte de las muestras.

El primer paso para el desarrollo de este proyecto, es el crear un protocolo que permita adquirir y trasladar las muestras desde Ecuador a España. Para esto se siguieron los siguientes pasos:

- Contactar con una persona de confianza que además tenga conocimientos sobre materiales y técnicas constructivas específicas de Ecuador.
- Hacer una lista de materiales que pueden ser evaluados.
- Contactar con correos y empresas para conocer condiciones y costos de los envíos, y hacer un presupuesto.
- Una vez que se tiene la lista y los costos, se realiza una selección de los materiales con los que se trabajara, y coordinar los envíos.
- Dadas las condiciones tanto de costos y legales, se recibirán 1 o 2 paquetes de 4kg, por cada envío.
- Los envíos consisten en 2 sets de muestras básicas sin recubrimiento, para realizar una evaluación inicial de las propiedades.
- Cada set de muestras está compuesto por un ladrillo industrial y uno artesanal.
- El envío de cada paquete de 4Kg tiene un costo aproximado de 60 euros.

Se descartó la realización de un solo envío grande debido a que el costo era de alrededor de 600 euros + tramites en aduanas por un máximo de 25kg, lo que resultaba al final mucho más costoso y engorroso.

3.2. Dimensiones y densidad

3.2.1. Equipamiento

Para la determinación de las dimensiones y la densidad superficial de las muestras de ladrillo se han utilizado los siguientes equipos:

- Calibrador Digital
 - Marca: Pasco scientific
 - Modelo: SE-8710



Figura 3.2-1. Calibre digital

- Flexómetro
 - Marca: Dicher – Darex



Figura 3.2-2. Flexómetro

- Regla



Figura 3.2-3. Regla

- Balanza digital
 - Marca: Adam Equipment
 - Modelo: ACH-30a



Figura 3.2-4. Balanza digital

3.2.2. Método para determinar las dimensiones de las muestras.

Para la determinación de las dimensiones de los ladrillos, se han realizado una serie de mediciones, en todas las caras, tomando en cuenta que su geometría no es del todo simétrica, según el siguiente esquema:

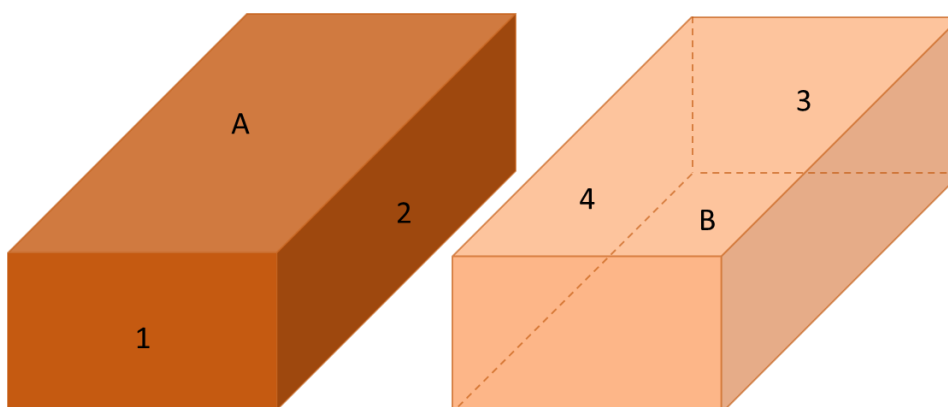


Figura 3.2-5. Designación de superficies

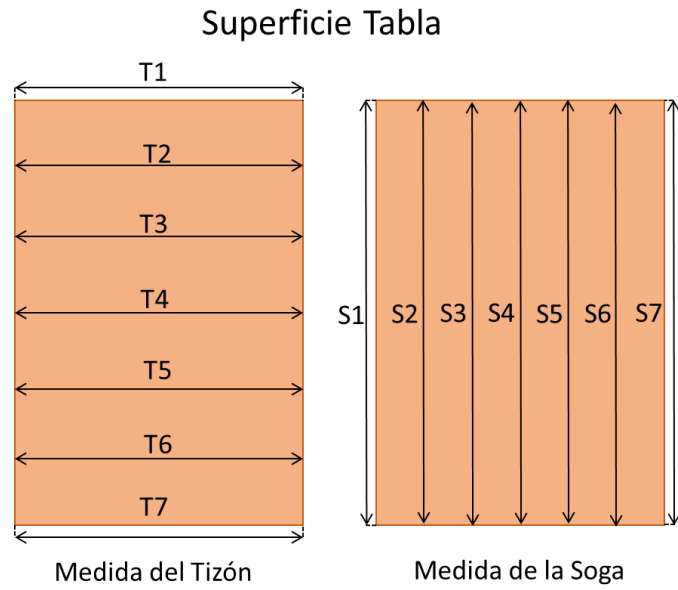


Figura 3.2-6. Esquema de medición – Tabla

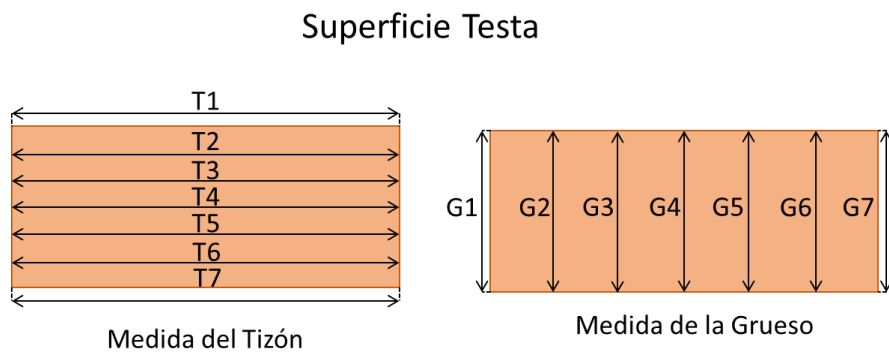


Figura 3.2-7. Esquema de medición – Testa

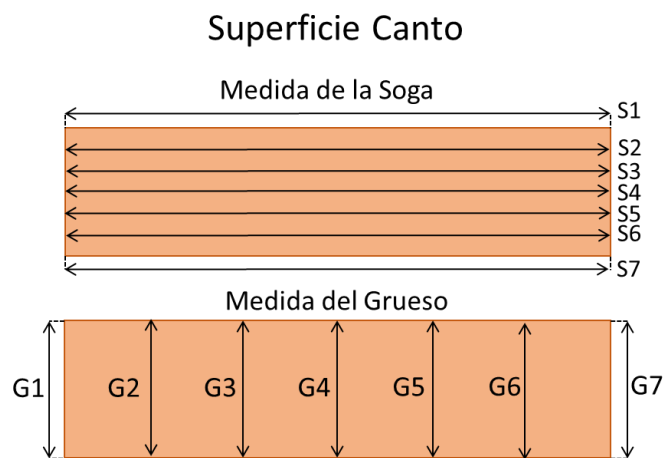


Figura 3.2-8. Esquema de medición – Canto

Una vez tomados los datos, se realiza un promedio para obtener los valores de soga, tizón y grueso, y con estos calcular el valor, del volumen siguientes expresiones:

- Promedio

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.2-1)$$

- Volumen

$$v = x * y * z \quad (3.2-2)$$

3.2.3. Método de cálculo de la densidad y masa por unidad de superficie

Una vez obtenidas las dimensiones y realizado el pesaje de la muestra, se procede a calcular la densidad, esto se lo realiza utilizando, una balanza de laboratorio y aplicando la siguiente formula:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad (3.2-3)$$

- Donde:
 - m es la masa
 - V es el volumen

Los valores obtenidos servirán como referente para las mediciones de coeficiente de transmisión térmica.

Para el caso de la masa por unidad de superficie esta se podría calcular dividiendo la densidad para una de las dimensiones, largo, ancho o alto, el problema está en que al ser distintas entre sí, se obtendrán valores diferentes, por lo que se ha remodelado el volumen como un cubo de densidad homogénea, al que se le sacará la raíz cubica para obtener el valor de las dimensiones que componen este cubo.

$$l_x = l_y = l_z = \sqrt[3]{v} \quad (3.2-4)$$

Luego se multiplicara el valor de la densidad por una de las dimensiones del cubo que se ha supuesto obteniendo así el valor de la masa por unidad de superficie. Estos valores serán de utilidad para el cálculo del aislamiento teórico.

3.3. Conductividad térmica

Previo a las mediciones de coeficiente de absorción que requieren que se corte la muestra, se realiza la medida de la conductividad térmica, que es una propiedad de los materiales, que indica la facilidad con la que estos pueden transmitir calor, depende de su composición, homogeneidad, temperatura y presión a las que está sometido, pero es independiente de su configuración geométrica.

El coeficiente de conductividad térmica (λ) permite dar un valor numérico a la característica de los materiales y expresa su capacidad de conducir calor.

La evaluación del coeficiente de transmisión térmica de los materiales, se aplicara la norma UNE EN 12667 Determinación de la resistencia térmica por el método de placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor.

En este caso en particular se trabajara con el medidor de flujo de calor HFM 436 Lambda de la marca NETZSCH, que es capaz de trabajar bajo las condiciones de la norma citada.

3.3.1. Equipamiento

- Medidor de Flujo de calor
 - Marca: NETZSCH
 - Modelo: HFM 436 Lambda



Figura 3.3-1. Unidad medidora de Flujo de calor³²

Este equipo es un dispositivo capaz de medir la densidad de la relación del flujo de calor a través de la diferencia de temperatura de la muestra generada por esta densidad de flujo de calor. Se conforma de un núcleo homogéneo, un detector de la diferencia de temperatura superficial (termopila con conexiones) y detectores de la temperatura superficial.

3.3.2. Principio

El medidor de flujo de calor es un equipo diseñado para establecer en el interior de muestras homogéneas, de caras planas y paralelas, de forma constante y uniforme la relación de densidad de flujo de calor, con una precisión aceptable, las condiciones necesarias para esto se dan en la parte central del equipo, mismo que está diseñado para obtener datos en ese punto.

Para proceder a la medición del flujo de calor (Φ) se debe llevar a un estado estable, la sección de medida de la muestra, además se debe conocer su área (A).

También, se mide mediante sensores fijados en las superficies de contacto temperatura a través de la muestra (ΔT).

Para determinar la resistencia térmica, se utilizan los datos de la densidad de relación de flujo de calor, la diferencia de temperatura, el espesor de la muestra (d) y el factor de transferencia (λ).

³² Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

Finalmente mide la conductividad térmica (λ) o transmisibilidad térmica (λ_t) de la muestra, normalmente se consideran muestras homogéneas, e isotrópicas, es decir que la conductividad térmica no es una función de la dirección, y se define en cada punto, también se considera que la muestra es térmicamente estable, es decir independiente del tiempo.

El valor que se obtiene es la conductividad térmica media, definido en condiciones de estado estable, siendo el cuerpo a evaluar una plancha limitada por dos caras paralelas, planas cuyas caras laterales son perpendiculares, y que se puede mantener estable dentro de los rangos de temperatura y tiempo de la medición.

3.3.3. Requisitos para la medición

La aplicación del método está condicionada a las limitaciones del equipo, estas son las exigencias básicas:

- Límites de la diferencia de temperatura.- La norma recomienda que las diferencias de temperatura estén en un rango de 10°K a 50°K, y se ajustaran según las necesidades.
- Temperatura máxima de funcionamiento.- Esta limitada por factores de desgaste del equipo y propiedades de la muestra.
- Conjuntos de tiempo e intervalo de medición.- El tiempo de medición debe permitir que la muestra llegue a condiciones de régimen estacionario, para esto se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:
 - Capacidades térmicas del sistema, tanto de la unidad enfriadora y calefactora.
 - Aislamiento del equipo.
 - Características de la muestra como su espesor y densidad.
 - Ambiente del ensayo.
 - Las fluctuaciones de temperatura a lo largo del tiempo no deben causar fluctuaciones eléctricas en el medidor de flujo, superiores al 2% durante el tiempo de ensayo.

- Acondicionamiento.- Consiste en preparar la muestra para lograr condiciones óptimas de medición, este puede ser, un secado en horno ventilado, o el aplanar las superficies con un lijado para garantizar un mejor contacto con la placa del equipo de medición.
- Mediciones previas.- antes de montar la muestra en el equipo de medición se deberá determinar:
 - Masa con una precisión mayor al 0.5%.
 - Espesor, ya que según las capacidades del equipo de medición, este está limitado, se debe medir si es posible con equipamiento que simule las condiciones de presión dentro del equipo de medición, en los puntos donde se evalúa.
 - Densidad, una vez determinada la masa y las dimensiones, se procede a calcular la densidad.

Si el acondicionamiento ha consistido en un secado, se deberá calcular la pérdida de masa y si durante este se ha realizado algún tipo de lijado, se deberá tomar en cuenta las variaciones en sus dimensiones.

- Requisitos específicos de la muestra.- La forma y características de la muestra influyen en la aplicación del método de medición, los requisitos más importantes se muestran a continuación:
 - Homogeneidad.- Si el material no es del todo homogéneo, se debe considerar que el tamaño de los poros o cualquier imperfección no debe superar 10% del espesor de la muestra.
 - Espesor.- Esta limitado por las características del equipo de medición, su valor mínimo depende de la precisión del equipo de medición, y el valor máximo depende de la capacidad del equipo.
 - Planitud.- Cuando se ensayan muestras rígidas, estas deben ser lo suficientemente planas para que el error de contacto con la placa del equipo no exceda el 0.5%.

- Paralelismo.- Se define desde el punto de vista del alto de la muestra y no debe haber variaciones superiores al 2%.

3.3.4. Método de ensayo

El procedimiento de ensayo comprende una serie de actividades que se llevarán a cabo para determinar las propiedades de transferencia de calor de un material.

3.3.4.1. Preparativos

- Para muestras sólidas, el medidor de flujo de calor NETZSCH HFM 436 Lambda, requiere idealmente muestras de 30 cm x 30 cm, y de un alto entre 5 [cm] y 10 [cm].
- Las caras deben ser lisas, planas y paralelas, si es necesario deberán ser lijadas.
- El espécimen debe ser lo más homogéneo posible al menos en la parte central en un área de 10 [cm] x 10 [cm].
- Se debe evitar discontinuidades en el material, sobre todo en el área central de medición para evitar mediciones erróneas.
- Las muestras de menor tamaño pueden ser analizadas, mediante el uso de piezas complementarias, del mismo material, que permitan llenar el área de 30 [cm] x 30 [cm], estas no pueden tener un área menor a 10 [cm] x 10 [cm].
- Otra opción es el utilizar un marco de un material de baja densidad, pero resistente al calor, esto se recomienda, para mediciones a temperaturas menores de 70°C.
- Si la muestra es rígida y presenta una conductividad térmica relativamente alta, se recomienda el uso de termopares para vencer el efecto de la resistencia térmica de contacto de las placas, este procedimiento se recomienda para placas de entre 5cm y 9cm de alto para permitir el adecuado funcionamiento del equipo, además del uso de protectores de caucho.

3.3.4.2. Procedimiento de medición

- El primer paso es encender el equipo, esta operación tomara unos 10 segundos hasta que se muestren en el panel frontal la lista de menús, si se va a utilizar un computador, este se debe encender también y abrir el software Q-Lab que permite operar el equipo.
- Colocación de la muestra:
 - Una vez iniciado el equipo, se debe empujar la parte superior de la compuerta para que esta se abra automáticamente.

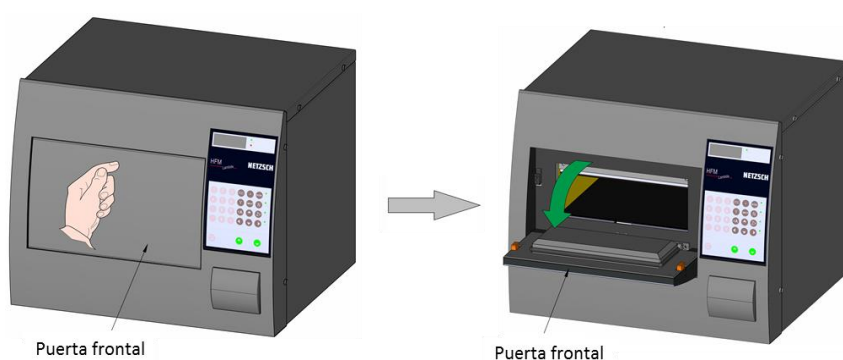


Figura 3.3-2. Abriendo la puerta de la unidad medidora³³

- La placa superior debe estar en su posición más alta para poder colocar a muestra al interior de la cámara de prueba con toda comodidad.



Figura 3.3-3. Colocando la muestra en la unidad medidora de flujo³⁴

³³ Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

³⁴ Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

- Una vez colocada la muestra se debe presionar los botones que controlan la posición de la placa superior, hasta lograr que esta tenga un contacto adecuado, el medidor cuenta con interruptores que harán que la placa pare en el punto adecuado.



Figura 3.3-4. Operando los controles de la placa superior³⁵

- Finalmente se cierra la puerta frontal de la unidad y se procede a configurar los parámetros de medición.



Figura 3.3-5. Cerrando la puerta frontal³⁶

- Configuración de la medición usando el computador.

³⁵ Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

³⁶ Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

- Una vez iniciada la aplicación Q-Lab, se debe ir a la pestaña de Run y dar clic en la opción Test Definition, se desplegarán una serie de ventanas donde se irán ingresando los datos del material como su grosor y densidad, también se establecen de las condiciones de medición respecto al tiempo y variación de temperatura.

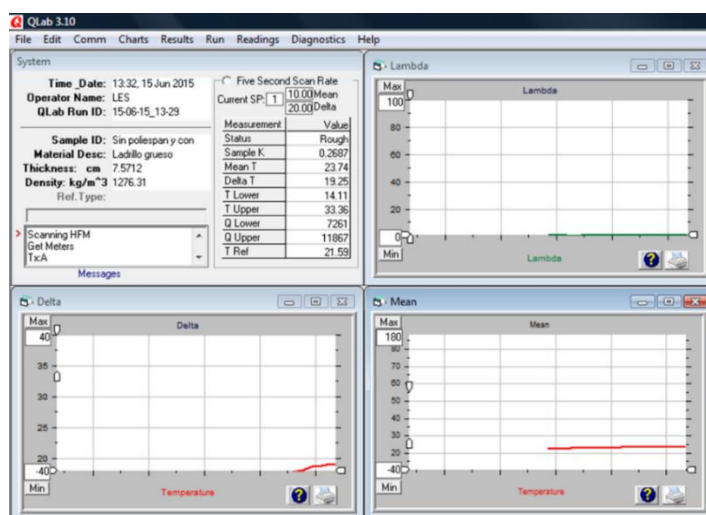


Figura 3.3-6. Pantalla inicial

- Para iniciar la configuración en el apartado de Run Type, se seleccionara el tipo de ensayo.

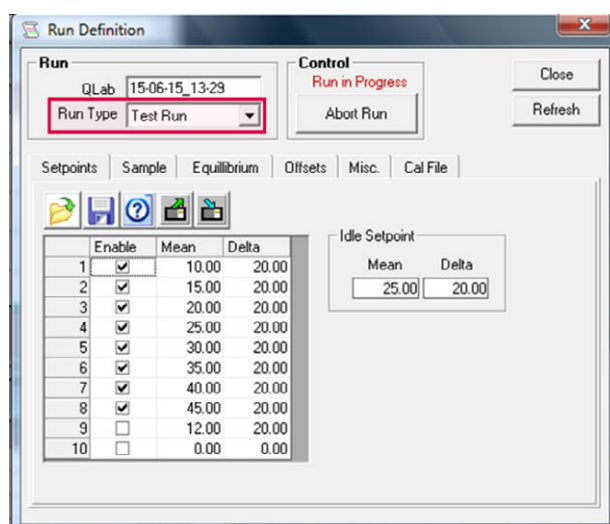


Figura 3.3-7 Selección tipo de ensayo

- En el apartado de Run ID se colocara un nombre al archivo que identificara a los resultados que serán guardados.

- En la pestaña de Setpoints, en el apartado de Idle Setpoint se deberá ingresar la temperatura media en el apartado Mean y la variación de temperatura en Delta, luego se deberá ir marcando para los puntos que se desea medir. Si la delta es positiva la muestra se calentara, si es negativa se enfriara.

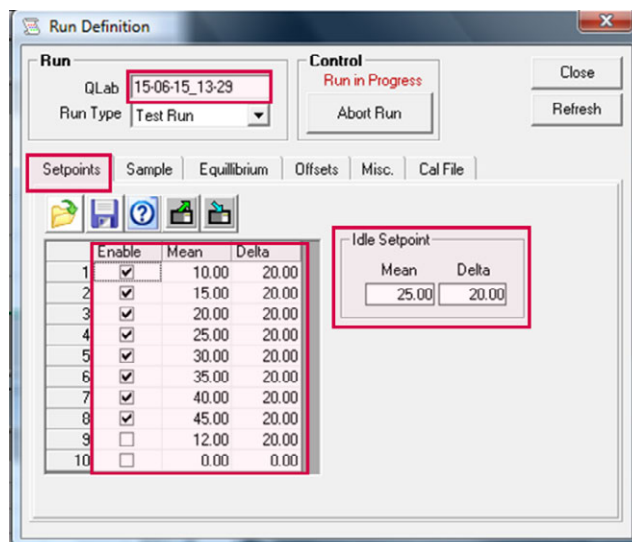


Figura 3.3-8 Configuración del rango de temperatura

- En la pestaña de Sample en el apartado de Sample ID se le dará un nombre o descripción al material ensayado.
- Si se usa la opción de Gauge Thickness, el grosor de la muestra será medido por la unidad, caso contrario si se realizó una buena evaluación del grosor de la muestra, se puede ingresar el valor medido marcando la opción User Thickness.
- Finalmente en el apartado Density se debe ingresar el valor de densidad de la muestra.

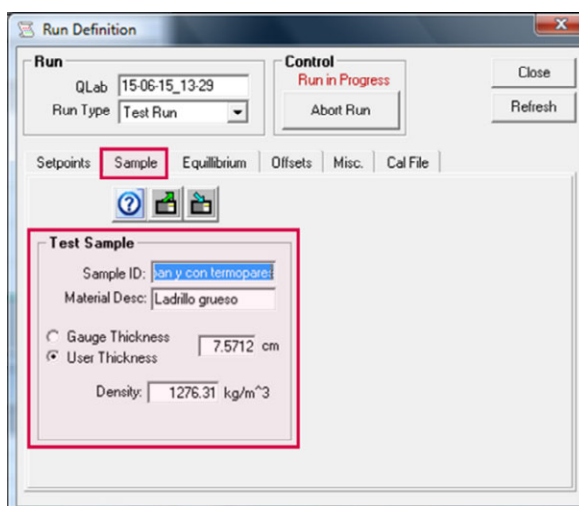


Figura 3.3-9 Ingreso de datos de grosor y densidad

- Las demás pestañas no serán tocadas ya que en estas están parámetros de la unidad que solo deben ser modificados en casos especiales.
- Finalmente cuando todos los parámetros han sido configurados, se da clic a Start Run para iniciar la medición, una vez iniciada la medición el botón de Start Run se convertirá en Abort Run, en caso de que se necesite parar la medición.

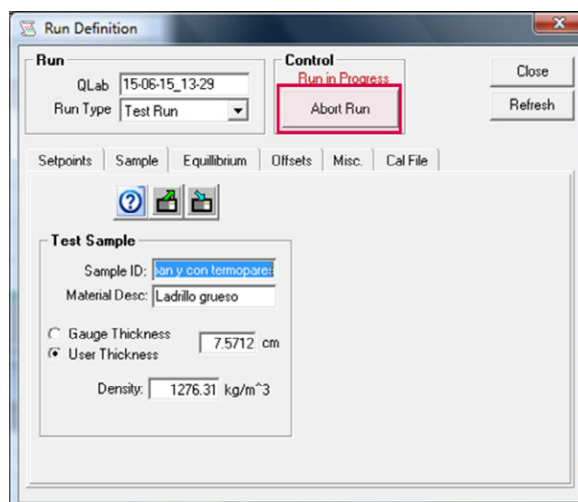


Figura 3.3-10 iniciando la medición

- Una vez realizada la medición los resultados obtenidos se verán reflejados en la pantalla del computador, y además la unidad los imprimirá.

- Configuración de los parámetros de medición en la unidad.

La unidad medidora de flujo de calor puede trabajar de manera autónoma sin necesidad de un computador, en los siguientes apartados se describe el proceso de configuración:

- Una vez encendida la unidad, para iniciar la configuración, se selecciona la opción Test Run en el menú principal que sale en la primera pantalla y se da Enter.

Main Menu	
Calibration Run	
Test Run	*
Define Moving	
View	
Print Test Results	
Calibration LVDT	
Save System Data	
Shutdown	
QLAB	
Reset	

Figura 3.3-11 Menú principal - Unidad medidora de calor³⁷

- La siguiente pantalla contiene valores relacionados con el movimiento del plato superior, solo pueden ser cambiados cuando se realiza una calibración, se debe dar Enter y pasar esta pantalla.

MoveUp	5.000
Move Down	2.600
Tolerance	0.010
CurrentDX	2.600

Figura 3.3-12 Pantalla de datos - movimiento plato superior³⁸

- Ahora se selecciona la opción Continue Run para entrar el menú de configuración de la medición.

³⁷ Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

³⁸ Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

MoveUp	
Move Down	
Continue Run	*

Figura 3.3-13 Ingreso al menú de configuración de la medición³⁹

- En la siguiente pantalla se podrán ingresar datos del material, nombre, grosor, densidad, número de serie y operador, el resto de parámetros se mantendrán.

Material
I.D.
Thickness
Density
QMet Length
QMet Width
Operator
Serial No.

Figura 3.3-14 Pantalla para el ingreso de datos de la muestra⁴⁰

- En la siguiente pantalla se ingresaran los valores medios (Mean T) y la variación de temperatura (Delta T), además se deberá habilitar cada punto que se desea medir poniendo Y.

#	MeanT°C	DeltaT	En
1	10.00	20.00	Y
2	20.00	20.00	Y
3	30.00	20.00	Y
4	40.00	20.00	Y
5	50.00	20.00	Y
6	60.00	20.00	Y
7	70.00	20.00	Y
8	80.00	20.00	Y
9	80.00	20.00	Y
10	0	20.00	N

Figura 3.3-15 Pantalla para el ingreso de temperatura para la medición⁴¹

³⁹ Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

⁴⁰ Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

⁴¹ Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

- Finalmente se da Enter a Start Test, para iniciar el ensayo.

Start Test	*
Stop Test	

Figura 3.3-16 Menú para iniciar la medición⁴²

- Una vez finalizado el ensayo, la unidad imprimirá los resultados.

3.4. Coeficiente de absorción acústica

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie, la energía se distribuye siendo una parte de esta reflejada, otra absorbida generándose transmisión estructural y hacia el otro lado de la partición.

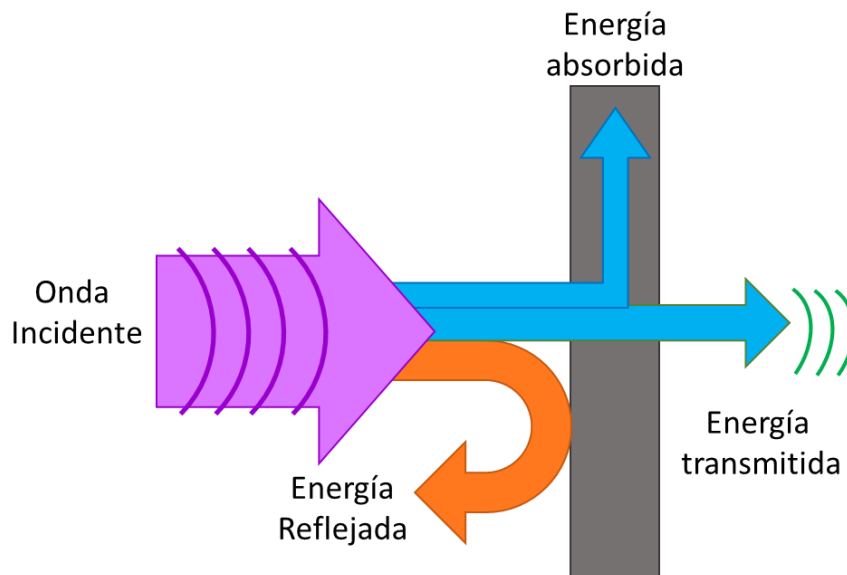


Figura 3.4-1 Distribución de la energía de una onda incidente en un sólido

Los fenómenos que se presentan al incidir una onda sobre una partición están caracterizados por coeficientes adimensionales que dan cuenta de la relación entre energía procesada y energía incidente, así tenemos:

⁴² Manual de usuario medidor de flujo de calor Netzsch HFM 436 Lambda.

- Coeficiente de reflexión acústica: Relación entre la energía o intensidad de la onda reflejada por la superficie del material y la energía o intensidad de la onda incidente.

$$\gamma = \frac{I_r}{I_i} \quad (3.4-1)$$

- Coeficiente de absorción acústica: Relación entre la energía o intensidad de la onda absorbida por la superficie del material y la energía o intensidad de la onda incidente.

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i} \quad (3.4-2)$$

El coeficiente de absorción acústica es una medida de la propiedad de absorción del sonido de los materiales, corresponde a la relación entre la cantidad de energía absorbida y la energía incidente, su valor varía entre 0 y 1, donde valores iguales a 1 significan que el 100% de la energía sonora incidente fue absorbida, y valores iguales a 0 indican que el 100% de la energía fue reflejada.

El coeficiente de absorción acústica y el coeficiente de reflexión acústica se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$\alpha + \gamma^2 = 1 \quad (3.4-3)$$

Donde se considera que la energía que no ha sido reflejada necesariamente es absorbida, independientemente de que si esta energía absorbida haya sido transmitida hacia el otro lado o a través de material.

Existen varios métodos para la evaluación de este parámetro, la mayoría de métodos son de laboratorio, que presentan restricciones respecto al rango de frecuencia y al tipo de materiales que se puede evaluar, también existen métodos insitu, son pocos y además presentan restricciones respecto al ancho de banda, tamaño de la muestra, relación señal ruido.

Para la evaluación de este parámetro se ha decidido utilizar dos métodos usando el tubo de impedancia, y la sonda de impedancia que es un método insitu, lo que permitirá, realizar adicionalmente una comparación y comprobación de la efectividad de ambos métodos.

3.4.1. Sonda de impedancia

La sonda de impedancia es un dispositivo en cuyo interior se encuentra un medidor de velocidad partícula y un micrófono para medir la presión sonora, estos suelen ser muy pequeños de tal manera que la medición se realiza en prácticamente en un solo punto, haciendo posible la medición simultanea de estos parámetros, y la evaluación directa de magnitudes derivadas como la intensidad o la impedancia, permitiendo el cálculo de los coeficientes de absorción acústica del material.

Esta técnica permite realizar mediciones directas en el lugar donde está la muestra de manera rápida y ágil. Su pequeño tamaño y configuración la hacen independiente respecto al rango de interés, además posee un amplio rango dinámico de velocidad en campo cercano, y la capacidad de medir intensidad sonora con índices altos de presión e intensidad.

3.4.1.1. Equipamiento

- Sonda de impedancia
 - Marca: Microflown
 - Modelo: PI-probe
- Altavoz
 - Marca: Microflown
- Estructura de amortiguamiento
 - Marca: Microflown
- Soporte de sonda
 - Marca: Microflown



Figura 3.4-2 Conjunto soporte+sonda+altavoz⁴³

- Acondicionador de señal (pareado con la sonda de impedancia)
 - Marca Microflown
 - Modelo MFSC-2



Figura 3.4-3 Acondicionador de señal

- Tarjeta de audio
 - Marca Microflown

⁴³ <http://www.acousticware.com/images/microflown/In-situabsorption2.png>

- Modelo MFDAQ-2 – Scout 442



Figura 3.4-4 Tarjeta de audio

- Computador
 - Marca: Acer
 - Modelo: Aspire 6930G



Figura 3.4-5 Computador

3.4.1.2. Principio

La sonda utilizada es del tipo PU (presión-velocidad) y está formada por un sensor de velocidad y otro de presión

Dentro de la sonda se encuentra el sensor microflown que es capaz de medir la velocidad de partícula, su funcionamiento se basa en evaluar la diferencia de temperatura entre dos hilos de platino muy finos, que están situados muy juntos en un espacio de aproximadamente 3 [mm] x 1 [mm] x 0.5 [mm] y que son precalentados a 300°C. Esta variación de temperatura ocasionada por el movimiento de las partículas se traduce en la variación de la resistencia en los hilos, todos estos cambios son directamente proporcionales a la variación de la velocidad de partícula acústica.

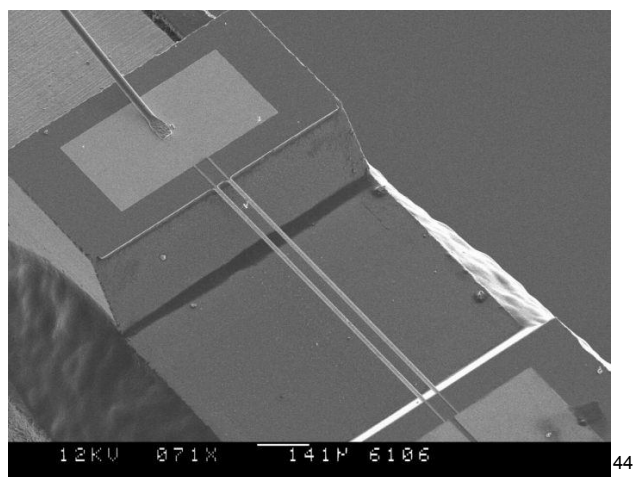


Figura 3.4-6 Imagen microscópica de un sensor microflown

Debido a los bajos niveles de radiación del altavoz para baja frecuencia, sobre todo para la evaluación de muestras de tamaño pequeño el límite de cálculo de la impedancia acústica se encuentra entre 100 [Hz] y 300 [Hz] a pesar de que la presión y velocidad pueden ser medidas en todo el rango audible.

Para la evaluación de absorción sonora Microflown ha creado un sistema que permite realizar mediciones insitu de absorción, y consta de un altavoz con una cubierta esférica y una sonda PU (Presión – Velocidad partícula), colocada a una distancia de 26cm del mismo, que puede cambiarse a conveniencia, pero debe permanecer constante durante la medición.

La absorción de la muestra dependerá de su geometría, de sus propiedades, de las condiciones del montaje y del campo sonoro que la rodea, la sonda PU, al medir directamente la velocidad de partícula y la presión sonora, permite el cálculo directo de

⁴⁴ <http://microflown-avisa.com/wp-content/uploads/2014/03/kopavs-3.jpg>

la impedancia como la división de la presión sonora para la velocidad partícula, para poder hacer este cálculo, la sonda debe trabajar con una fuente sonora conocida, y tener una caracterización del campo sonoro del lugar donde está la muestra, esto se logra a través del generador del software que controla la sonda y de una calibración que consiste realizar una medición apuntando la sonda al centro del recinto.

3.4.1.3. Requisitos para la medición

- La distancia entre la sonda y el altavoz debe mantenerse constante durante la medición, se recomienda que este entre 0.2m y 0.5m.
- Para minimizar los efectos del entorno sobre todo para mediciones en lugares no anecóicos la sonda debe ubicarse cerca de la muestra, procurando ser menor a un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia más alta a evaluar.
- Si bien en algunos estudios se recomienda que la muestra sea de al menos de 1m², en otros de 0.25m², esto está condicionado con las distancias entre la muestra, la fuente y la sonda.
- El tiempo recomendado por el fabricante para la toma de datos es de 10 segundos.

3.4.1.4. Método de ensayo

El funcionamiento del sistema consiste en colocar la sonda cerca de la muestra a evaluar para medir simultáneamente el campo directo y su reflexión, con un modelo del campo sonoro, el ángulo de reflexión puede ser calculado a partir de la presión sonora y la velocidad de partícula.

El campo sonoro es creado por la fuente, cuya distancia hacia la sonda es conocida (26cm) y que está condicionada por el soporte de la sonda, también se conoce la distancia entre la sonda y la muestra, por lo que para efectos de cálculo el software considera frentes de onda planos. También por la cercanía entre la sonda y la muestra no se consideran las reflexiones en otras superficies

- Montaje muestra

Para poder realizar una comparación del método de medición se han utilizado dos configuraciones de la muestra:

- Rodeada de material absorbente



Figura 3.4-7 Muestra rodeada de material absorbente

- Rodeada de material reflectante



Figura 3.4-8 Muestra rodeada de material reflectante

- Montaje sonda - altavoz
 - El primer paso será montar la sonda y el altavoz en el soporte.



Figura 3.4-9 Montaje sonda - Altavoz

- Ahora se monta el conjunto trípode que permitirá mantener la distancia entre la sonda y la muestra constante.



Figura 3.4-10 Sistema montado

- Para obtener una variedad de resultados, se irá cambiando la distancia entre la fuente y la sonda.

- Conexiones

Una vez que se ha montado el sistema, se procede a realizar las conexiones de acuerdo con el siguiente esquema:

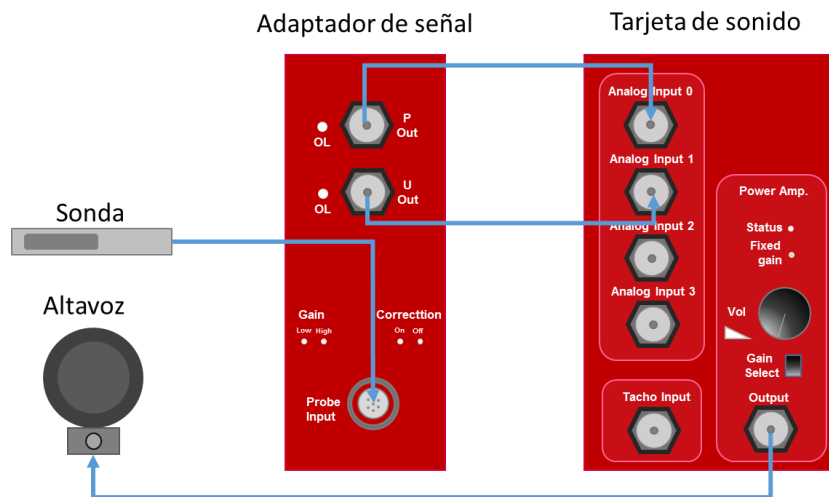


Figura 3.4-11 Esquema de conexiones paneles frontales

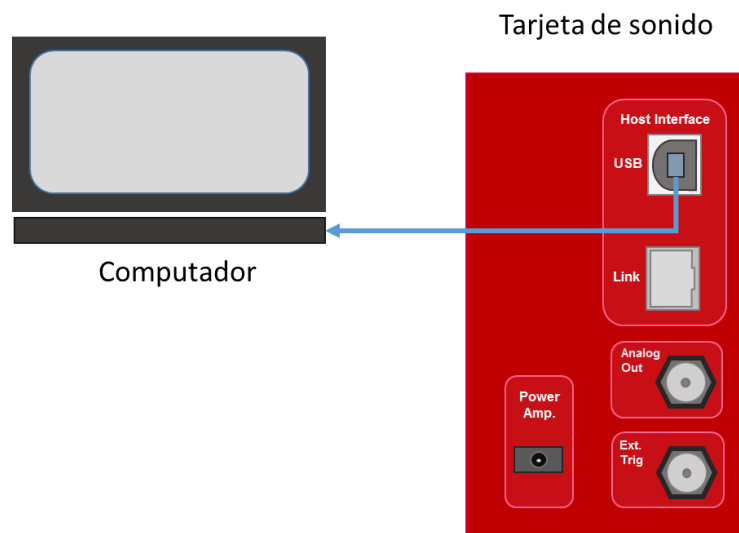


Figura 3.4-12 Esquema de conexiones panel posterior

- Configuración del software y medición
 - Una vez realizado el montaje, se procede a abrir el programa Microflown impedance 3.1 en el computador.

- En el menú de impedance settings, comprobamos los siguientes apartados:

Global settings.- en este se confirmarán valores de temperatura, densidad el aire, velocidad del sonido, distancia muestra-sonda y distancia altavoz-sonda.

Global Settings

Default Calibration Path: C:\Program Files (x86)\Microflown Technologies\Impedance 3.1\Calibra

Default Measurement Path: C:\Program Files (x86)\Microflown Technologies\Impedance 3.1\Measur

Default Project Path: C:\Program Files (x86)\Microflown Technologies\Impedance 3.1\Project

Probe Name: Default

Ambient temperature: 21 °C

Rho: 1.1839 kg*m⁻³

Speed of sound: 344.12 m/s

Distance sphere-probe: 0.26 m

Distance probe-sample: 0.005 m

Figura 3.4-13 Configuraciones globales

Acquisition Settings.- en este apartado se comprobará que las entradas y salidas estén bien asignadas.

Acquisition Settings

Sample Rate: 48000

Input adapter: winsound

Input ID: 0

Input: 1-2

Micr ?

Calibrate Input

Output adapter: winsound

Output ID: 0

Altavoces (3-Dispositivo de Hi

Figura 3.4-14 Configuraciones de adquisición de datos

Coefficient calibration.- aquí se confirmará que los valores de cada apartado coincidan con los proporcionados por el fabricante.

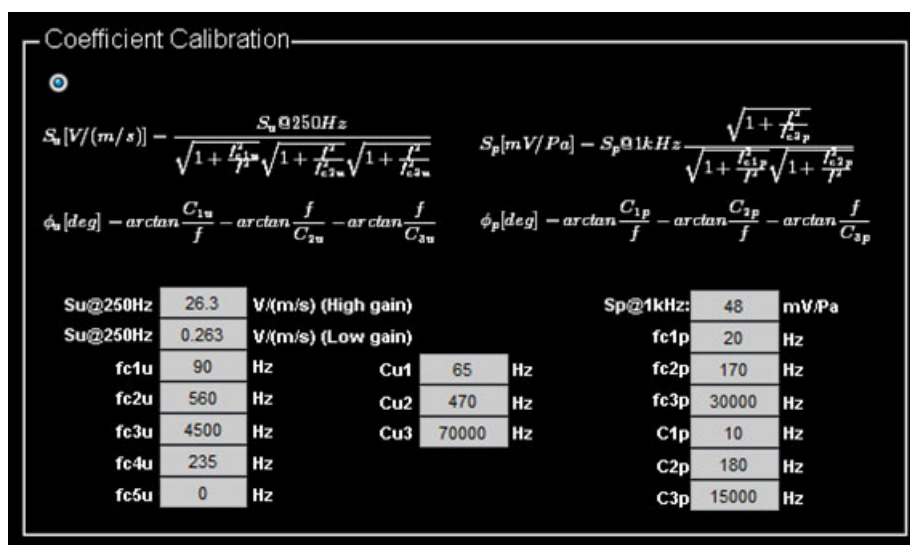


Figura 3.4-15 Coeficientes de calibración

Parameters pressure equations		
Sensitivity Cornerfrequencies		
Sp@1kHz	48	[mv/Pa]
Sensitivity cornerfrequencies		
fc1p	20	[Hz]
fc2p	170	[Hz]
fc3p	30000	[Hz]
Phase cornerfrequencies		
C1p	10	[Hz]
C2p	180	[Hz]
C3p	15000	[Hz]

Parameters velocity equations		
Sensitivity in high gain		
Sp@250Hz	26,3	[mv/Pa]
Sensitivity in low gain		
Sp@250Hz	0,263	[mv/Pa]
Sensitivity cornerfrequencies		
fc1u	90	[Hz]
fc2u	560	[Hz]
fc3u	4500	[Hz]
fc4u	235	[Hz]
Phase cornerfrequencies		
C1u	65	[Hz]
C2u	470	[Hz]
C3u	70000	[Hz]
C4u	235	[Hz]

Tabla 3.4-1 Parámetros proporcionados por el fabricante

- Ahora en la pantalla de Measure, a revisar que la marca este en Calibrate para realizar una calibración, que consiste en levantar el conjunto sonda – altavoz y dar clic en Start, esto permite obtener datos tanto del ruido de fondo, como de la acústica del recinto donde se está evaluando la muestra.

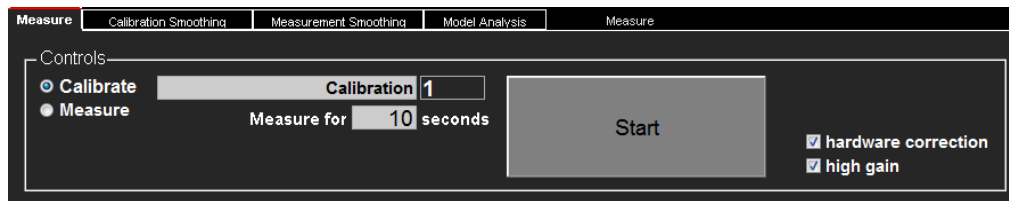


Figura 3.4-16 Configuración de calibración

- En la pestaña de Calibration shooting, se asigna el archivo de calibración correspondiente a la medición que se acaba de hacer, presionando el botón de Cal.

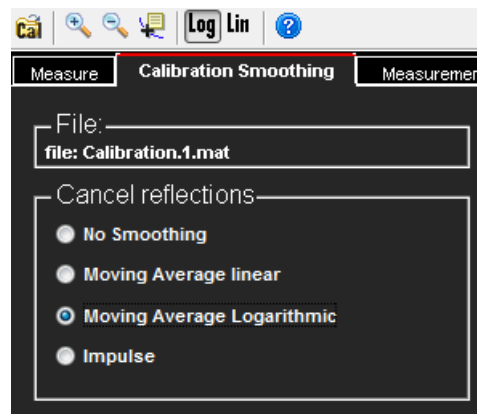


Figura 3.4-17 Asignación del archivo de calibración

- De vuelta a la pestaña de Measure, se marca en measure, confirmando que este seleccionado el apartado de Use calibration from the next tab, para aplicar la calibración que se realizó anteriormente y se procede a realizar la medición.



Figura 3.4-18 Configuración de medición

- Una vez realizadas las mediciones, en la ventana de Measurement se puede analizar cualquier archivo de medición abriéndolo a través del botón Me, escogiendo el modelo de cancelación de reflexiones.

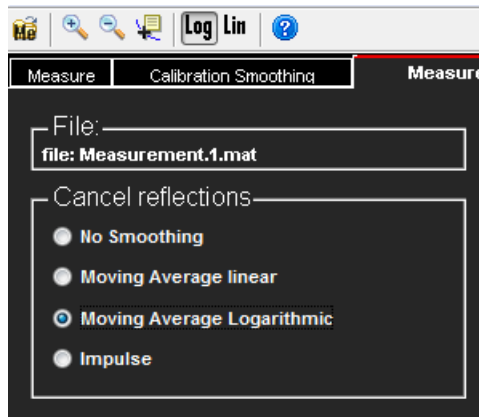


Figura 3.4-19 Configuración del análisis de medida

En el apartado de Measurement analysis se observan los gráficos de los parámetros analizados.

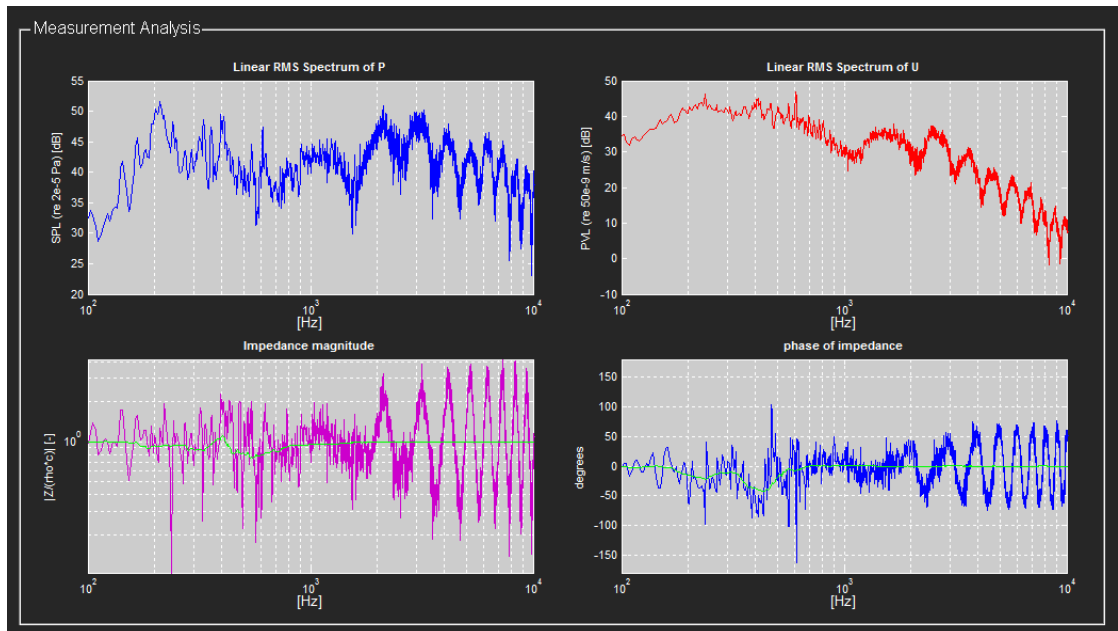


Figura 3.4-20 Parámetros analizados

- Finalmente en la pestaña de Model Analysis, se puede abrir una medición para analizarla aplicando los criterios de Plane wave (onda plana), mirror source (fuente espejo) o Q-term.

Para los modelos de análisis de Fuente espejo (mirror source) y Q-term es necesario especificar las distancias fuente-sonda y sonda-muestra.

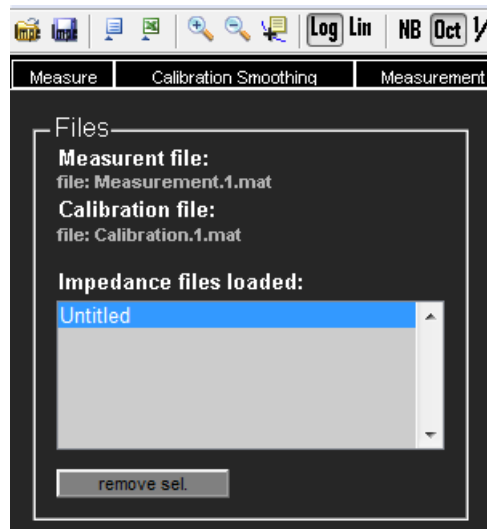


Figura 3.4-21 Opciones de análisis de mediciones

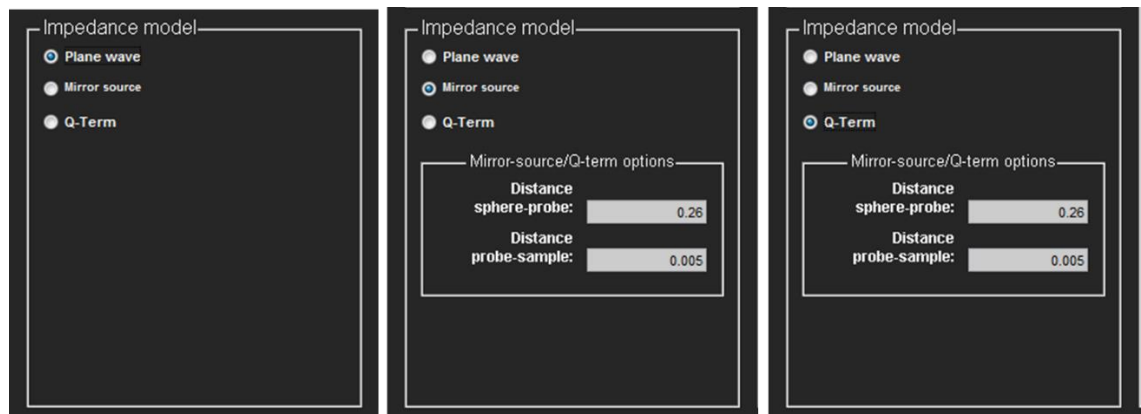


Figura 3.4-22 Criterios de análisis

3.4.2. Tubo de impedancia

El tubo de Kundt es un dispositivo que inicialmente fue ideado para visualizar ondas sonoras, se lo uso inicialmente para estudiar las ondas estacionarias y la determinación de la velocidad del sonido. En la actualidad su uso más común es la medición de propiedades acústicas de los materiales como la impedancia acústica o el coeficiente de absorción acústica.

3.4.2.1. Equipamiento

- Tubo de impedancia con altavoz integrado
 - Marca: Brüel & Kjaer

- Modelo: 4206

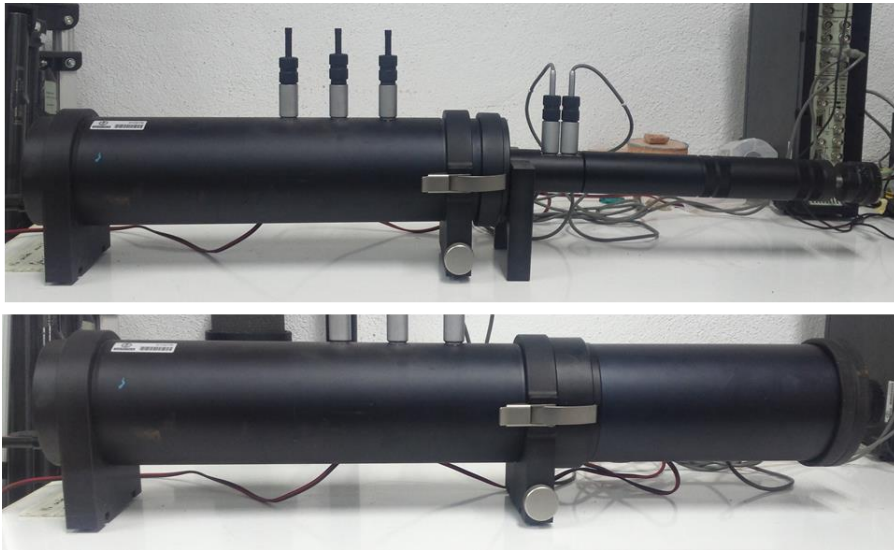


Figura 3.4-23 Tubo de impedancia con su adaptador para alta frecuencia y baja frecuencia

- Pareja de micrófonos pareados
 - Marca: Brüel & Kjaer
 - Modelo: 4187
 - Número de serie: Micrófono A 193779 y Micrófono B193780



Figura 3.4-24 Pareja de micrófonos pareados

- Amplificador
 - Marca: Pioneer
 - Modelo: A-305R



Figura 3.4-25 Amplificador

- Computador
 - Marca: Acer
 - Modelo: Aspire 6930G

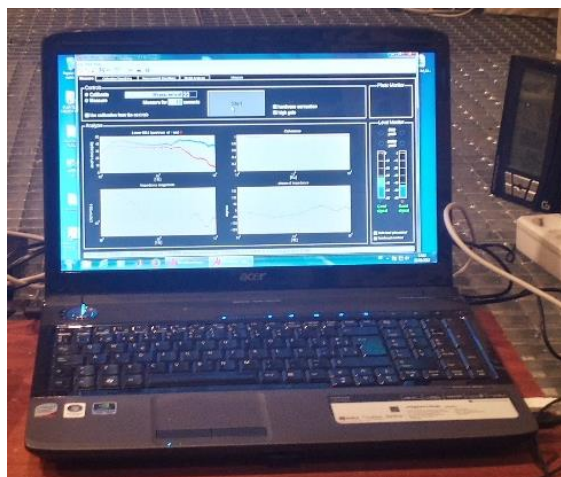


Figura 3.4-26 Computador

- Pulse
 - Marca: Brüel & Kjaer
 - Modelo: 7700

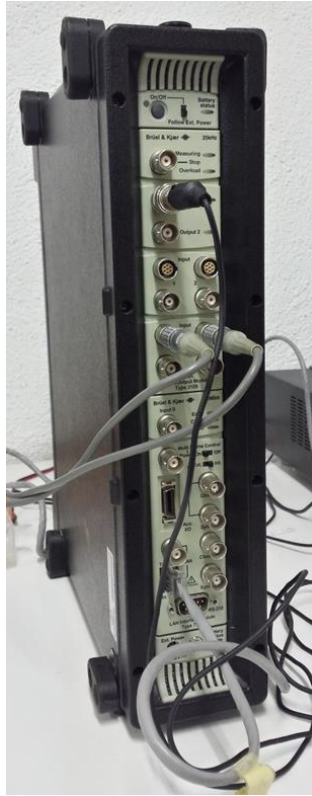


Figura 3.4-27 Pulse

- Herramientas de corte variadas



Figura 3.4-28 Herramientas de corte

3.4.2.2. Principio

Esta medición se realiza aplicando la norma UNE-EN ISO 10534-2:1998, que contempla el método de ensayo para la determinación del coeficiente de absorción acústica para incidencia normal de absorbentes acústicos mediante el uso de un tubo de impedancia con dos posiciones de micrófono y un sistema de análisis de señal. Este mismo sistema puede aplicarse para la determinación de la impedancia superficial o de la admitancia acústica de los materiales que se relacionan con propiedades físicas de los materiales como la resistencia al flujo de aire, porosidad, elasticidad y densidad.

Este método se basa en generar ondas planas mediante una fuente de ruido, la descomposición del campo de interferencia se realiza mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones fijas, mediante dos micrófonos montados en la pared, o uno móvil, para seguidamente realizar el cálculo de la función de transferencia compleja, la absorción a incidencia normal y cocientes de impedancia.

El ensayo se realiza colocando las muestras de ensayo en uno de los extremos del tubo de impedancia mismo que debe ser rígido, recto, liso y estanco, y en el otro una fuente sonora capaz de generar ondas planas.

Las magnitudes se determinan en función de la frecuencia, donde la resolución en frecuencia está condicionada por la frecuencia de muestreo y la longitud de onda de la señal del sistema digital de análisis usado.

El diámetro del tubo y las distancias entre las posiciones de los micrófonos influyen en el rango de frecuencia útil a evaluar que se puede expandir mediante el uso de diferentes diámetros espaciados.

Las mediciones pueden realizarse mediante el uso de 2 técnicas:

- Método 1.- Utilizando dos micrófonos en posiciones fijas, esta técnica requiere un procedimiento de corrección que puede ser previo o simultáneo para minimizar las diferencias de amplitud y fase entre los micrófonos. Combina rapidez, precisión y sencillez para su implementación, se recomienda para fines generales.
- Método 2.- Usando un solo micrófono en dos posiciones sucesivas, para este método se necesita un procesado y una generación particular lo que puede implicar más tiempo, pero elimina las diferencias de fase entre micrófonos permitiendo un posicionamiento óptimo a cualquier

frecuencia, esta técnica se recomienda para la medición de resonadores sintonizados y mediciones de precisión.

Para este caso en particular se aplicará el método 1 de 2 micrófonos.

3.4.2.3. Requisitos para la medición

Según las exigencias de la norma UNE-EN ISO 10534-2:1998 estos son los requerimientos básicos para la medición:

- Características del tubo de impedancia

Se requiere un tubo de impedancia que cuente con un portamuestras en un extremo y una fuente acústica en el otro, además debe presentar 2 o 3 aberturas para la colocación de los micrófonos, siendo posibles otras posiciones mediante el uso de sondas microfónicas para el montaje centrado.

Características generales del tubo de impedancia:

- Sección recta constante (precisión 0.2%).
- Paredes rígidas, lisas, no porosas, sin agujeros ni fisuras en la sección de ensayo.
- Las paredes también deben ser lo suficientemente pesadas y macizas preferentemente metálicas y para tubos de secciones mayores hormigón estanco y liso, para que no entre en vibración por efecto de las señales acústicas, y no presente resonancias en el intervalo de frecuencia útil del tubo.
- En el caso de paredes metálicas se recomienda un espesor de aproximadamente el 5% del diámetro para tubos circulares, en el caso de secciones rectangulares, las esquinas deben ser lo suficientemente rígidas para evitar distorsiones de las placas en estas, se recomienda que el grosor sea aproximadamente el 10% de la sección transversal del tubo.
- En el caso de los tubos de hormigón las paredes deben sellarse con un revestimiento adhesivo liso para asegurar la estanquidad del aire. Si se trata de tubos de madera, se aplica el mismo

principio, y además conviene reforzar y amortiguar las paredes mediante un revestimiento exterior de acero o plomo.

- Para tubos de sección rectangular, contruidos mediante placas se debe cuidar que no hayan fugas, ya que los tubos deberían aislarse del ruido y vibraciones del exterior.
 - La longitud del tubo de impedancia debe permitir el desarrollo de ondas planas entre la fuente y la muestra y permitir la colocación de los micrófonos en el campo de ondas planas.
- Intervalo y frecuencia de trabajo

Está definido por:

$$f_1 < f < f_u \quad (3.4-4)$$

Donde:

$f_1 \rightarrow$ Frecuencia de trabajo más baja del tubo, está limitada por la precisión del equipo de procesado de la señal.

$f \rightarrow$ Frecuencia de trabajo.

$f_u \rightarrow$ Frecuencia de trabajo más alta del tubo, se elige para evitar que se produzcan modos de propagación de ondas no planas.

Condición para f_u :

- Para tubos de sección circular de diámetro interior d [m] y f_u [Hz] y velocidad del sonido c_0 [m/s].

$$d < 0.58\lambda_u; f_u \cdot d < 0.58 c_0 \quad (3.4-5)$$

- Para tubos de sección rectangular, con una longitud lateral máxima d [m].

$$d < 0.5\lambda_u; f_u \cdot d < 0.5 c_o \quad (3.4-6)$$

La distancia s [m] entre los micrófonos se escoge mediante la siguiente expresión:

$$d < 0.5\lambda_u; f_u \cdot d < 0.5 c_o \quad (3.4-7)$$

Es decir que la frecuencia más baja depende además de la precisión del sistema, de la distancia entre micrófonos, que ni debe exceder en el 5% la longitud de onda de frecuencia más baja de interés, si se satisface la ecuación anterior, una para una mayor distancia entre micrófonos la precisión de las mediciones aumenta.

- Características y montaje de los micrófonos

Se debe utilizar micrófonos idénticos en cada posición, si estos se montan en las paredes, el diámetro debe ser pequeño comprado con c_o/f_u además se recomienda que sea inferior al 20% de la distancia entre ellos. Para montaje en las paredes se recomienda micrófonos de presión y para montajes interiores micrófonos de campo libre.

Cuando se trata de montajes en la pared los micrófonos deben estar colocados con el diafragma coincidiendo con la pared interior, a menudo se necesita un pequeño retranqueo tal como se muestra en la figura, este debe ser lo más pequeño posible e idéntico para los micrófonos en ambas posiciones. La rejilla del micrófono debe sellarse a la capsula y además es necesario un sellamiento entre el micrófono y el orificio de montaje.

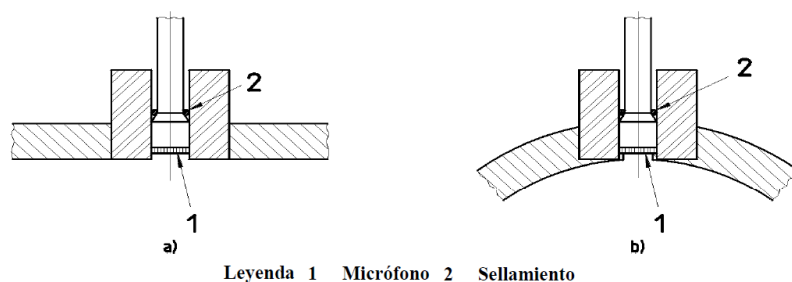


Figura 3.4-29 Montajes típicos de los micrófonos⁴⁵

Cuando se use un micrófono en dos posiciones sucesivas, la posición sin usar debe sellarse para evitar fugas y mantener una superficie lisa dentro del tubo.

Si se usan micrófonos de ventilación lateral, es importante que los orificios de ecualización de presión no queden bloqueados por el montaje.

Las posiciones de los micrófonos deben conocerse con una precisión de al menos $\pm 0,2\text{mm}$ y registrarse la distancia entre estos s , para micrófonos móviles las posiciones deben conocerse con una precisión de al menos $\pm 0,5\text{ mm}$.

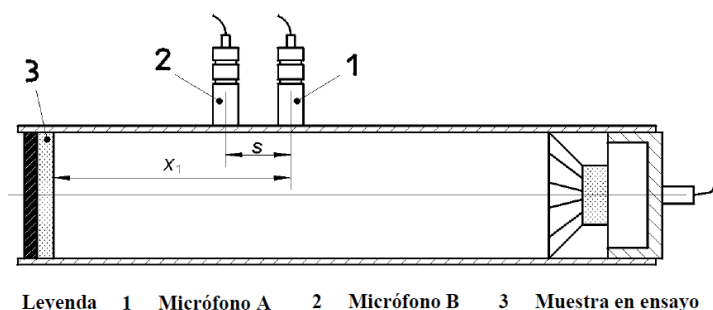


Figura 3.4-30 Posiciones de micrófonos y distancias⁴⁶

- Requerimientos del porta muestras

⁴⁵ Norma UNE-EN ISO 10534-2 (julio 2002) "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia, Parte 2: Método de la función de transferencia"

⁴⁶ Norma UNE-EN ISO 10534-2 (julio 2002) "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia, Parte 2: Método de la función de transferencia"

El portamuestras puede formar parte integrante del tubo de impedancia o ser un elemento separado que se fija durante las mediciones, debe ser lo suficientemente grande como para albergar muestras con espacio de aire posterior según las necesidades.

Si el portamuestras es del tipo separado, su forma interior y dimensiones deben adaptarse a las del tubo de impedancia con una precisión de $\pm 0.2\%$, el montaje debe ser hermético sin inserción de juntas elásticas, se recomienda el uso de vaselina para conseguir estanquidad.

Para tubos circulares, se recomienda hacer accesible la muestra de ensayo tanto por el extremo anterior como posterior del portamuestras lo que permite controlar el posicionamiento adecuado y la planitud frontal y trasera de la muestra.

La placa trasera del portamuestras debe ser rígida y estar fijada fuertemente y herméticamente al tubo ya que esta sirve como superficie rígida para algunas mediciones, se recomienda como mínimo 2 cm de espesor. Para algunos ensayos se requiere una superficie de descompresión para la muestra de ensayo, lo que se logra interponiendo un volumen de aire entre la placa posterior y el objeto.

- Características del altavoz

En uno de los extremos del tubo de impedancia se debe colocar un altavoz de membrana (o uno de cámara de compresión para altas frecuencias), el montaje debe realizarse en el lado opuesto al portamuestras, la superficie de la membrana del altavoz debe cubrir como mínimo $2/3$ partes del área de la sección transversal del tubo de impedancia, se puede colocar coaxial con el eje del tubo, inclinado o conectado al tubo por un codo.

El altavoz debe colocarse en una caja aislada evitando toda transmisión por vía aérea y por los flancos al micrófono, además debe contar con un aislamiento vibracional elástico entre el tubo de impedancia y este para evitar la excitación acústica del tubo de impedancia.

Para evitar las resonancias que siempre aparecen en la columna de aire del tubo, se debe revestir su interior en la zona cercana a altavoz en una longitud de 200mm como mínimo con un material acústico absorbente.

- Características del generador de señales.

El generador de señales debe ser capaz de generar una señal estacionaria con densidad espectral plana en el rango de frecuencias de interés, esta señal puede ser aleatoria, pseudo-aleatoria, pseudo-aleatoria periódico, o trinos según se necesite.

Si se utiliza la técnica de un solo micrófono se recomienda una señal determinista, las señales pseudo-aleatorias se adaptan bien aunque requieren un procesamiento especial, que implica una correlación de una secuencia m mediante la transformada rápida de Hadamard para proporcionar una respuesta de impulso, a continuación se obtiene la respuesta en frecuencia aplicando la transformada de Fourier a esta respuesta de impulso.

Para la calibración del tubo se requiere un generador de frecuencias discretas y una pantalla gráfica con una incertidumbre de máximo $\pm 2\%$.

- Características de la instrumentación para el procesamiento de señales.

Para el procesamiento de señales se requiere un amplificador y un procesador bicanal de transformada rápida de Fourier (FFT), este sistema debe medir la presión acústica en las dos posiciones del micrófono y calcular la función de transferencia H_{12} entre ellas, además el generador debe ser capaz de producir la señal fuente necesaria compatible con el sistema.

El rango dinámico debe ser superior a 65 dB, los errores de estimación de la función de transferencia H_{12} debidos a las no linealidades, resolución, inestabilidad y sensibilidad a la temperatura de los equipos deben ser inferior a 0.2dB.

Si se usa un solo micrófono, el sistema de análisis debe poder calcular la función de transferencia H_{12} de la señal del generador y las dos señales medidas consecutivamente.

- Montaje de la muestra

La muestra debe ajustarse bien al portamuestras, sin ser comprimida ni ajustada demasiado para que no quede abombada, se recomienda sellar cualquier hendidura con vaselina o cera, si fuera necesario se puede tapar y

engrasar la totalidad el borde para fijarla de una manera más fuerte, evitando movimientos de vibración o bolsas de aire no deseadas.

Para muestras de ensayo cuya cara anterior es plana, esta debe montarse en un plano normal al eje del tubo, especificando su posición con tolerancias mínimas. Para muestras de caras planas y lisas la tolerancia debe ser de $\pm 0.5\text{mm}$, y para el caso de materiales porosos de baja densidad se puede usar una rejilla metálica no vibrante de celdas grandes para definir la superficie.

Si la superficie de la muestra es irregular, se debe escoger posiciones de micrófono lo suficientemente alejadas de tal forma que la función de transferencia medida corresponda a la zona de onda plana. Cuando la parte posterior de la muestra sea irregular y pueda producir un espacio de aire indeseado, se deberá poner una capa de relleno tipo vaselina entre la muestra y la placa reflectora de cierre, sellando la parte trasera de la muestra, permitiendo tener una parte frontal de la muestra paralela a la placa de cierre.

Es conveniente ensayar dos muestras y más de dos si estas no son uniformes, en series repetidas usando las mismas condiciones de montaje.

3.4.2.4. Método de ensayo

En este método al igual que en la primera parte de la norma (UNE-EN ISO 10534-2:1998) usa un tubo de impedancia con una fuente sonora en un extremo y la muestra en el otro, no obstante en este caso se generan ondas planas, la descomposición del campo interferencial se realiza mediante la medición de la presión acústica en dos posiciones de micrófono fijas en las paredes del tubo lo que permite realizar el cálculo de la función de transferencia compleja, la absorción a incidencia normal, y los coeficientes de impedancia del material que se está evaluando.

- Ensayos y mediciones preliminares

La instrumentación de ensayo debe conectarse como se muestra en la figura, y comprobarse antes de su utilización para una serie de ensayos, esto facilita la eliminación de las fuentes de error y satisfacer las exigencias mínimas.

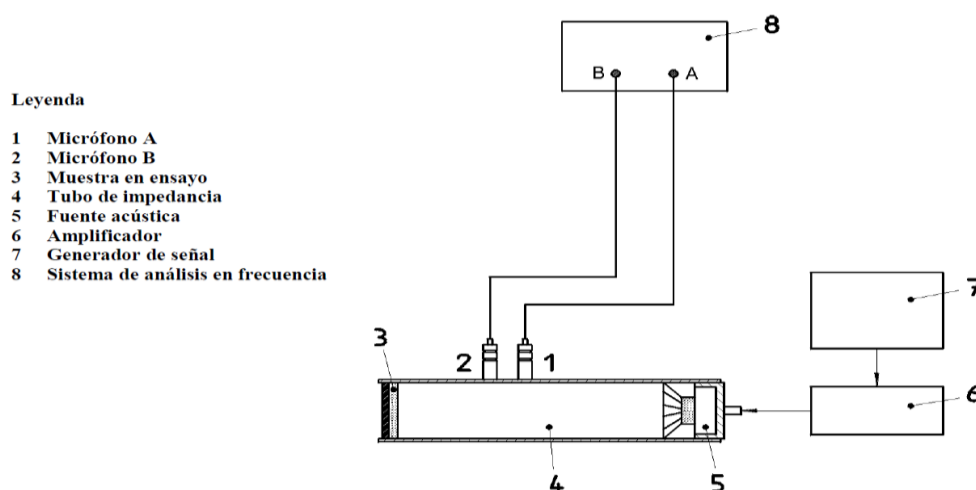


Figura 3.4-31 Conexiones recomendadas por la norma⁴⁷

Se puede considerar dos tipos de controles, los previos a cada ensayo y las calibraciones periódicas, en cada caso la norma recomienda que el altavoz se ponga en funcionamiento al menos 10 minutos previamente a cada ensayo para permitir que la temperatura se estabilice.

Los controles previos y posteriores a cada ensayo consisten en:

- Calibración en amplitud de micrófono.- se debe realizar posteriormente a cada ensayo, con una precisión de ± 0.3 [dB] respecto a una fuente estable en el intervalo de frecuencias de trabajo.
- Medición de temperatura con una precisión de ± 0.5 grados kelvin y presión del aire.
- Relación señal ruido.- Previo a cada ensayo se debe medir el espectro de presión acústica en cada posición de micrófono con la fuente funcionando y luego apagada. El espectro de la fuente acústica debe superar en al menos 10[dB] al ruido de fondo en todas las frecuencias referenciadas.

⁴⁷ Norma UNE-EN ISO 10534-2 (julio 2002) "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia, Parte 2: Método de la función de transferencia"

Las calibraciones periódicas consisten en una serie de mediciones que permiten aplicar correcciones para el tubo.

- Preparativos

Para poder realizar la medición para alta y baja frecuencia se debe cortar las muestras en forma circular con diámetros de 100 [mm] y 29 [mm], para esto se han utilizado herramientas de corte variadas.



Figura 3.4-32 Muestras cortadas

- Conexiones

Las conexiones deben realizarse mediante el siguiente esquema:

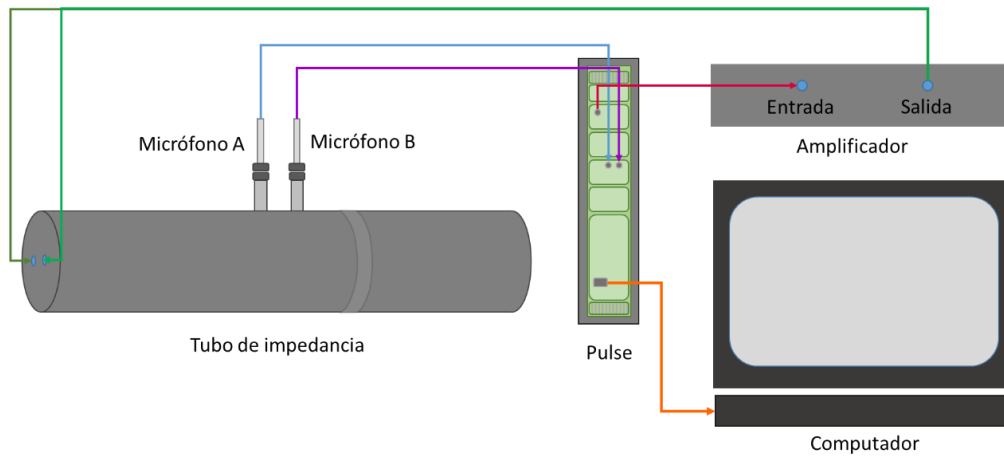


Figura 3.4-33 Esquema de conexiones

Donde se conectara desde Output 1 Pulse se entra al amplificador, para luego conectar la salida de este al altavoz del tubo de impedancia.

- Montaje de la muestra

La muestra se debe colocar en el interior de porta muestras, centrada y con su superficie en un plano normal al eje del tubo, se deben sellar las hendiduras, la norma recomienda vaselina, pero para este caso se ha utilizado plastilina.



Figura 3.4-34 Muestra montada

- Configuración y ensayo

Una vez armado el sistema, se procede a iniciar el programa pulse y a configurar la plantilla.

- Una vez abierto el programa se encuentra la plantilla de Project set up, en la pestaña Tube se seleccionara el tamaño del tubo, Large para la medición de baja frecuencia y Small para la medición de alta frecuencia.

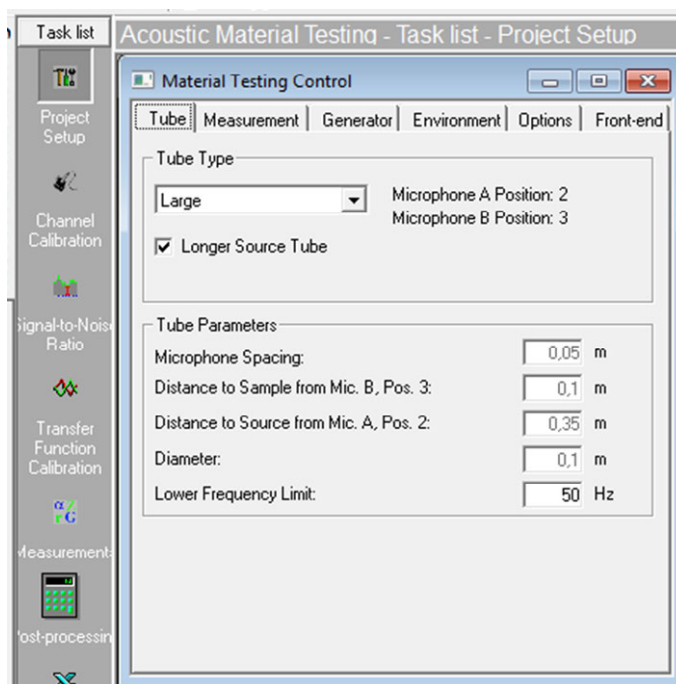


Figura 3.4-35 Selección del tamaño del tubo

- En la pestaña de Measurement, revisamos que el rango de frecuencias este acorde al tubo seleccionado, en este caso para el tubo grande se tiene rango entre 800[Hz] y 1.6 [KHz], con una resolución de 2[Hz] lo que hará que la medida tome alrededor de 25 segundos.

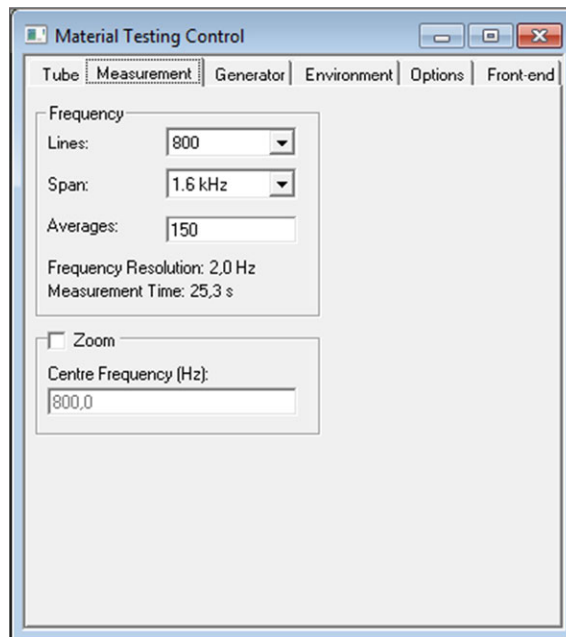


Figura 3.4-36 Intervalo y tiempo de medición

- En la pestaña de Generator se confirma que este sea aleatorio (Random).

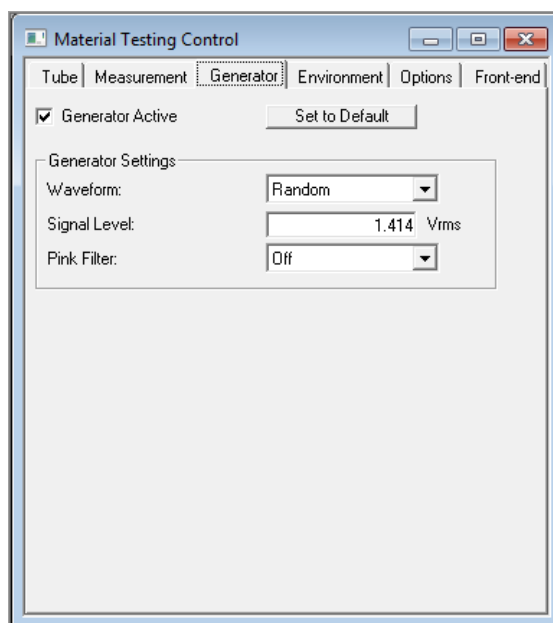


Figura 3.4-37 Tipo de generador

- En la pestaña de Enviroment se verifican los datos ambientales como la presión atmosférica, la temperatura y humedad.

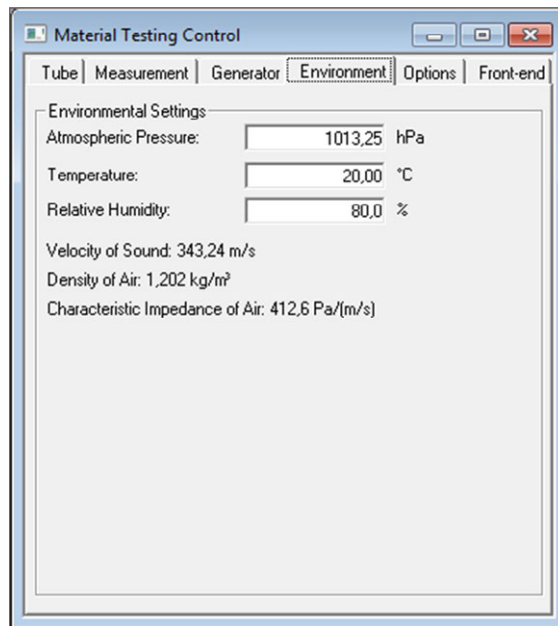


Figura 3.4-38 Parámetros ambientales

- Los parámetros de advertencia se encuentran en la pestaña Options, aquí se debe confirmar que estos estén acorde con la norma.

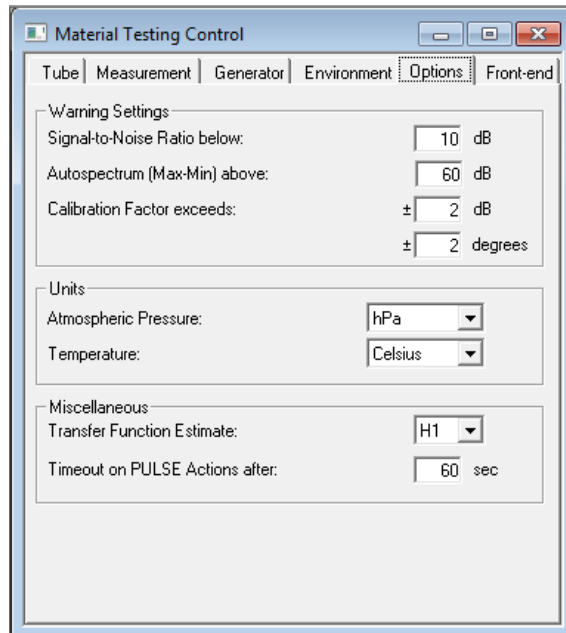


Figura 3.4-39 Parámetros de advertencia

- Finalmente en la pestaña Front-end, se debe verificar que el modelo y número de serie de los micrófonos correspondan, a la forma como se los ha conectado, para la señal B se usara el micrófono B cuyo número de serie termina en 80. Luego se da clic en Conect signals para que el programa realice una verificación de las conexiones, finalmente aparecerá el mensaje de Signals connected.

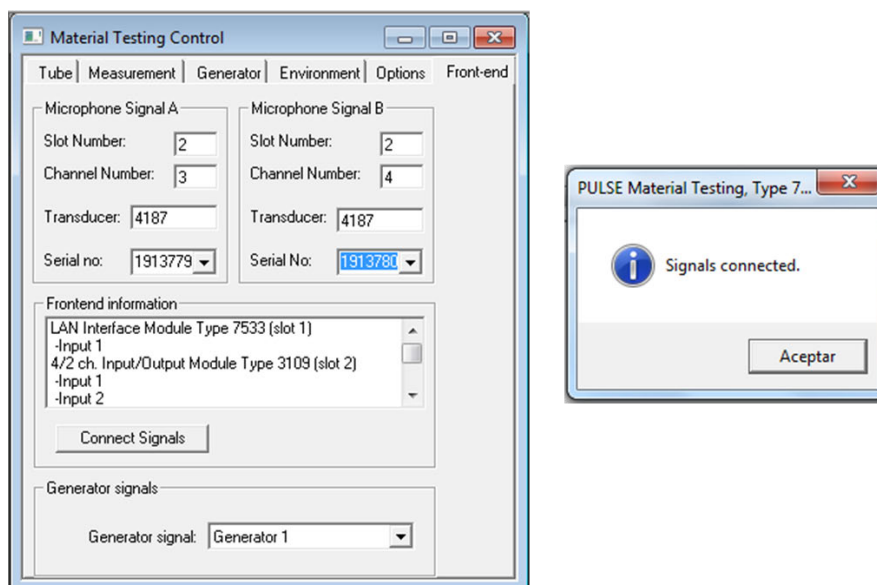


Figura 3.4-40 Verificación de conexiones

Antes de pasar a la calibración de canal, se debe activar la plantilla, es indispensable realizarlo en este punto, caso contrario el sistema dará errores.

- Se debe ingresar a través del menú Organizer al apartado Measurement para abrir el Measurement Organizer que es donde se activara la plantilla dando clic derecho en el tubo que se está utilizando, en este caso Large, para dar clic en Activate template.

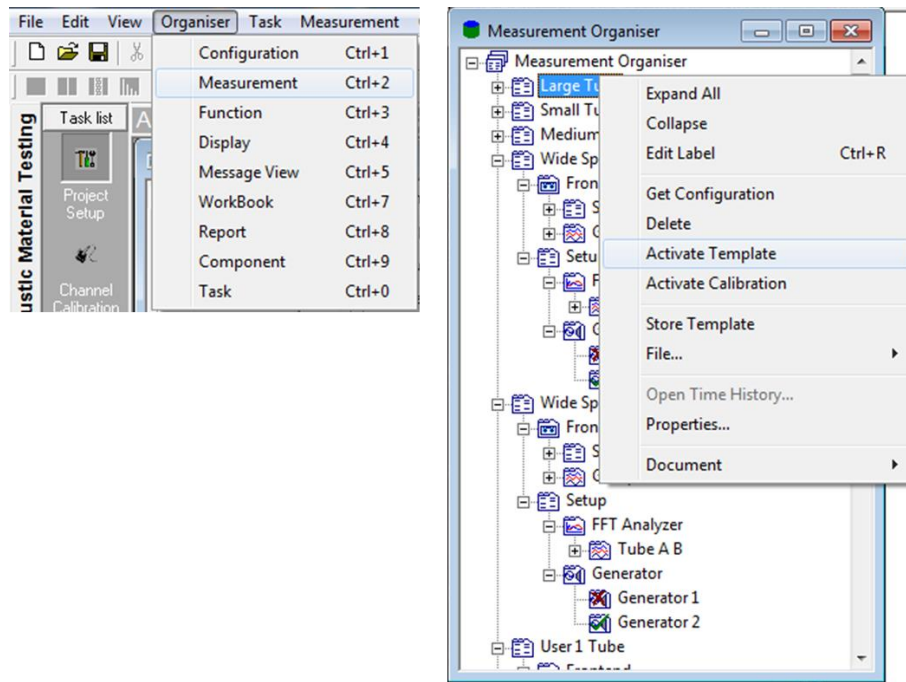


Figura 3.4-41 Activación de la plantilla

Una vez realizada esta operación y al pasar al apartado de Signal to Noise ratio, saldrá esta señal de advertencia, esta debe ser ignorada.

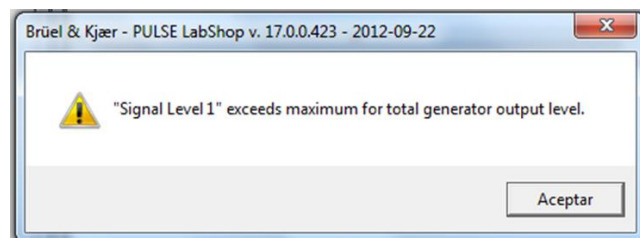


Figura 3.4-42 Mensaje de advertencia

Para continuar, se debe evaluar el ruido de fondo y compararlo con la señal emitida por el altavoz

- En el apartado de Signal to Noise Ratio, se debe marcar Background Noise Measurement, y dar al botón de Start para iniciar la medición de ruido de fondo.

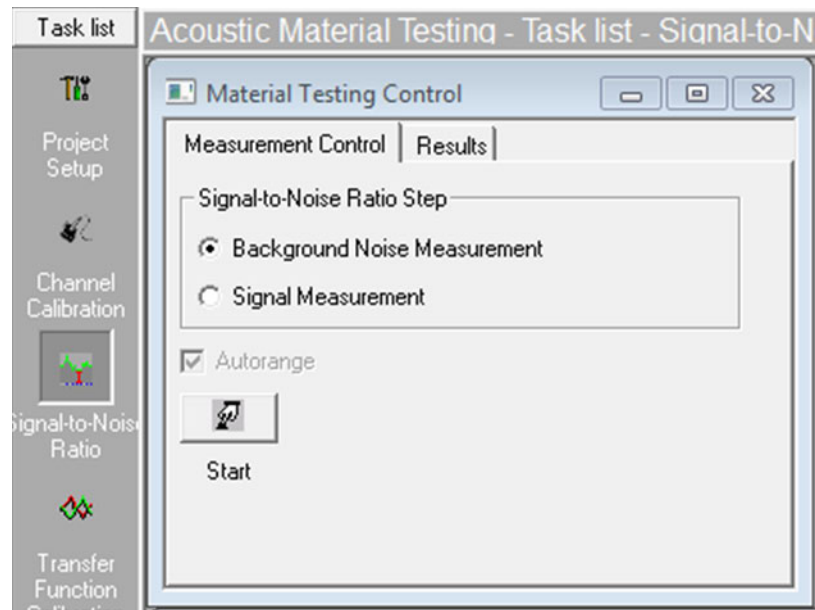


Figura 3.4-43 Medición de ruido de fondo

- Una vez realizada la medición de ruido de fondo, se marca Signal measurement, y dar al botón de Start, se debe controlar que los niveles de la señal no saturen.

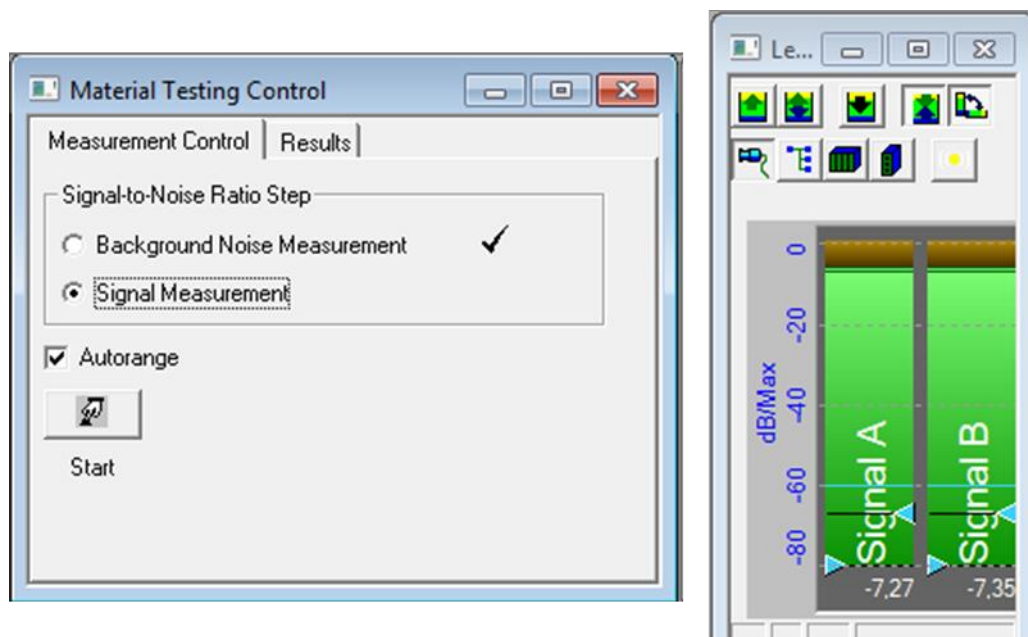


Figura 3.4-44 Medición del nivel de la señal

- Una vez realizadas ambas mediciones, se debe comprobar en la gráfica si entre el ruido de fondo y la señal existen 10 [dB], si no

es así, se debe subir el nivel de la señal en el amplificador, y realizar de nuevo este proceso.

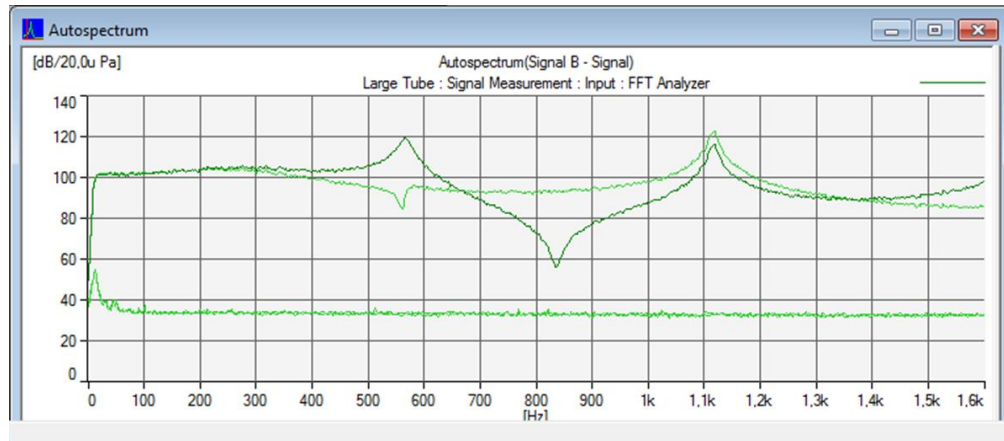


Figura 3.4-45 Nivel de la seña vs Nivel del ruido de fondo.

El siguiente paso es realizar la calibración de la función de transferencia, para esto se entra en el apartado Transfer Function Calibration.

- El primer paso de la calibración consiste en realizar una medición con los micrófonos intercambiados, se debe revisar que este marcada la opción de Interchange Microphone Positions, y dar al botón de Start.

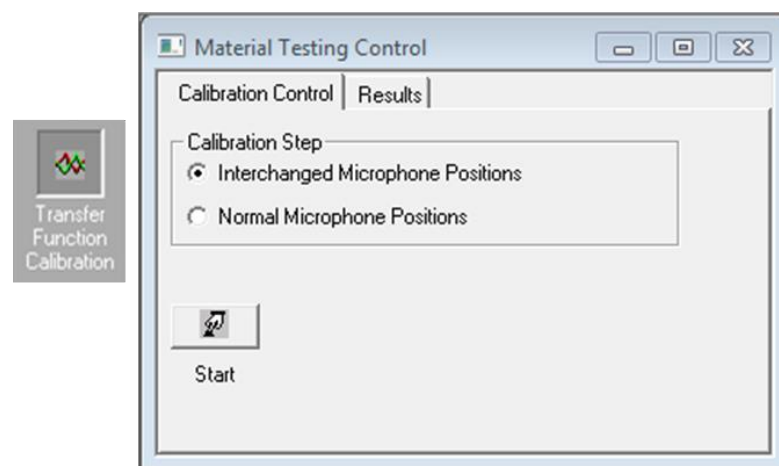


Figura 3.4-46 Calibración - Medición con micrófonos intercambiados

- Una vez realizada la medición intercambiando la posición de los micrófonos, se los vuelve a su posición original, y se realiza una

nueva medición, se observa que este marcado el apartado de Normal Microphone Posistions, y se da al botón Start.

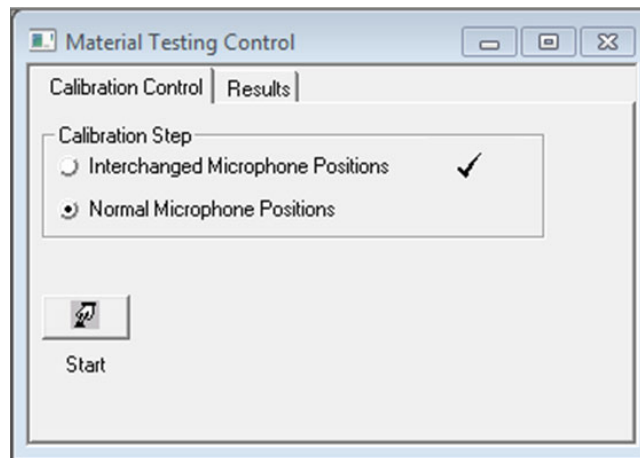


Figura 3.4-47 Calibración - Medición con micrófonos en posición original.

Una vez que se ha configurado todo el sistema se pasa al apartado Measurement, donde se dará nombre a cada medición y se la pondrá en lista con el botón de Add, para luego iniciar la medición con el botón de Start.

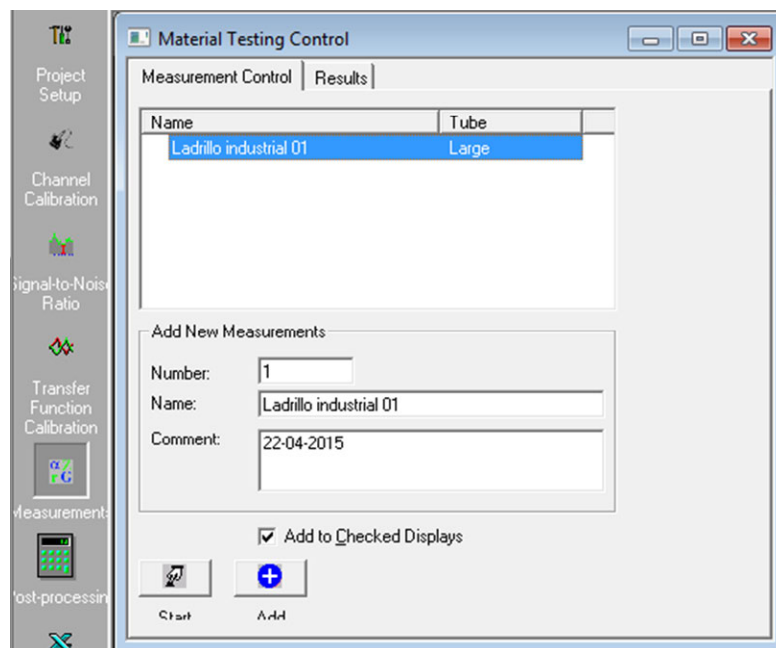


Figura 3.4-48 Proceso de medición

En la ventana de Material Testing Explorer, se puede ir visualizando un listado con las mediciones realizadas, aquí se las podrá marcar para que su

grafico aparezca en la ventana visualización y además se podrán realizar acciones como cambiar nombre, borrar, o modificar el color del grafico correspondiente a través del clic derecho del ratón.

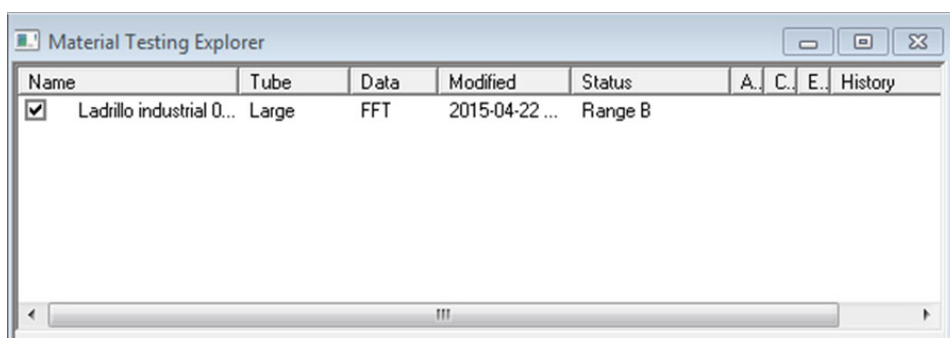


Figura 3.4-49 Ventana de listado de mediciones.

En la ventana de visualización, se observa el resultado de la medición, además aquí se pueden modificar las características del grafico para mejorar la visualización.

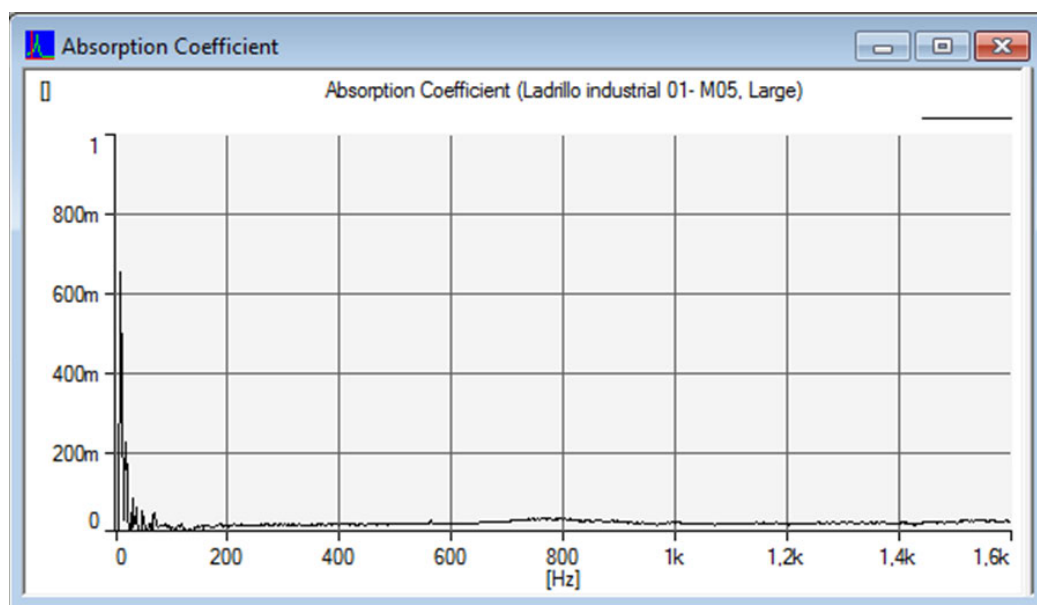


Figura 3.4-50 Ventana de visualización

En el apartado de post processing, se puede realizar una serie de cálculos como el promedio, o combinar las mediciones del tubo grande y del pequeño para obtener un resultado para todo el espectro de frecuencias, también se pueden extraer los datos en bandas de octava, tercio de octava o media octava.

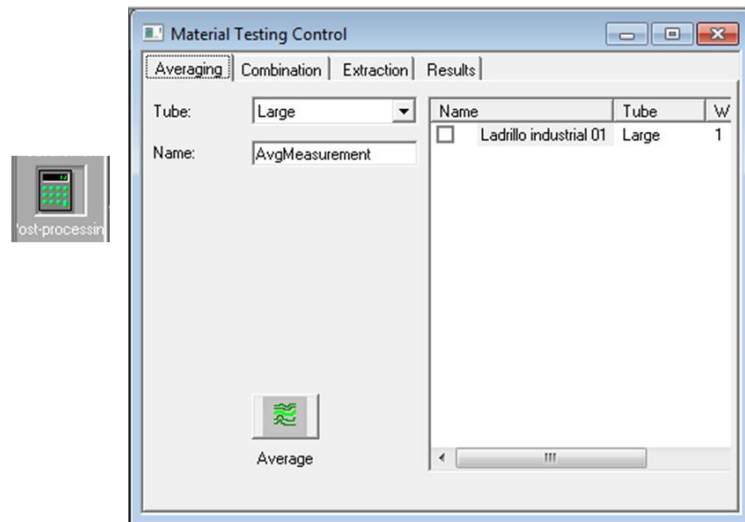


Figura 3.4-51 Promediado de datos

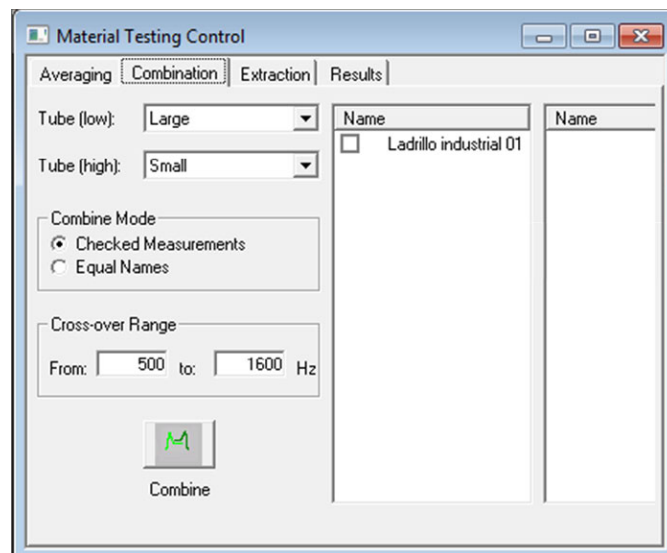


Figura 3.4-52 Combinación de mediciones de alta y baja frecuencia

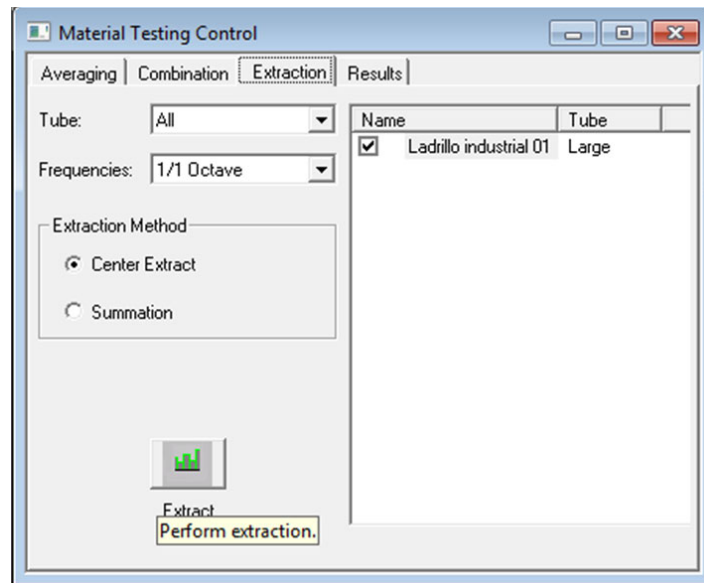


Figura 3.4-53 Extracción de datos por bandas

El último paso consiste en exportar los resultados a Excel para su procesamiento final, en el apartado de extracción se puede seleccionar que mediciones y que resultados se exportaran, además de la ubicación del archivo que se generará.

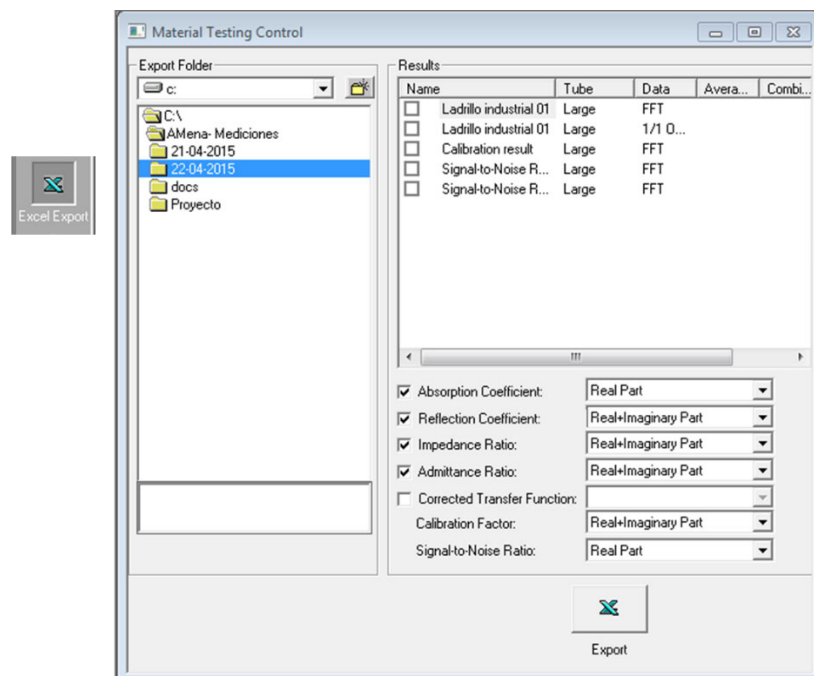


Figura 3.4-54 Exportando resultados a Excel

3.5. Calculo teórico del aislamiento acústico

Debido a que para este estudio solo se ha podido trabajar con muestras pequeñas, lo que ha imposibilitado el realizar una medición de las características de aislamiento acústico, por lo que se hará un cálculo teórico del índice de reducción acústica, para incidencia directa, aleatoria y de campo.

3.5.1. Definiciones

- Coeficiente de transmisión acústica

. Coeficiente de transmisión acústica: Relación entre la amplitud o intensidad de la onda transmitida a través del material y la amplitud o intensidad de la onda incidente.

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} \quad (3.5-1)$$

Este coeficiente cuantifica una característica intrínseca del material, y depende de variables como la densidad superficial, la frecuencia de la onda incidente y su ángulo de incidencia, que puede aproximarse para paneles delgados o membranas pesadas:

$$\tau_0(\theta) = \left[1 + \left(\frac{\omega m_s \cos\theta}{2\rho_0 c_0} \right)^2 \right]^{-1} \quad (3.5-2)$$

Donde:

$\omega \rightarrow$ frecuencia angular de la onda incidente $[rad/seg]$

$m_s \rightarrow$ Densidad superficial $[Kg/m^2]$

$\rho_0 \rightarrow$ Densidad el aire $[Kg/m^3]$

$c_0 \rightarrow$ Velocidad del sonido $[m/s^2]$

- Índice de reducción acústica R

Cuantifica el aislamiento que aporta una partición en decibeles para una banda de frecuencia especificada, relacionando la energía sonora incidente con la energía sonora transmitida.

Se define como el logaritmo en base 10 del inverso del coeficiente de transmisión acústica, se expresa en decibeles y es función de la frecuencia.

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} [dB] \quad (3.5-3)$$

3.5.2. Cálculo del Índice de Reducción Acústica R

Si se considera una partición simple, donde los materiales que la forman están rígidamente unidos de tal manera que se mueve como si fuera una sola, para este efecto se considera particiones delgadas y homogéneas.

Los parámetros físicos que mayor incidencia tienen sobre el valor del índice de reducción acústica son: la masa, la rigidez de la partición, las resonancias, el efecto de coincidencia, la frecuencia y ángulo de incidencia de la onda, siendo el rango de frecuencias de interés las bandas entre 100 y 5000 HZ.

Para realizar el cálculo del índice de reducción acústica, de elementos simples de una hoja se debe considerar, que al incidir la onda en la partición se producen vibraciones forzadas fuera del campo reverberante y por vibraciones naturales producidas por las vibraciones desde el contorno de la pared siendo este el campo resonante. La norma UNE-EN 12354-1 2002 en su anexo B, presenta un modelo matemático que permite el cálculo de R, siempre y cuando se conozca sus dimensiones, su densidad superficial, el factor de pérdidas y los factores de radiación, esto funciona bien en situaciones teóricas, pero en la práctica no siempre se conocen todos estos elementos, siendo los más problemáticos los factores de pérdidas y radiación, para esto existen algunas simplificaciones que permiten realizar una aproximación.

Para realizar el cálculo de esta aproximación se dividirá el comportamiento de la partición simple en 4 zonas en el dominio de la frecuencia, como se puede observar en el gráfico:

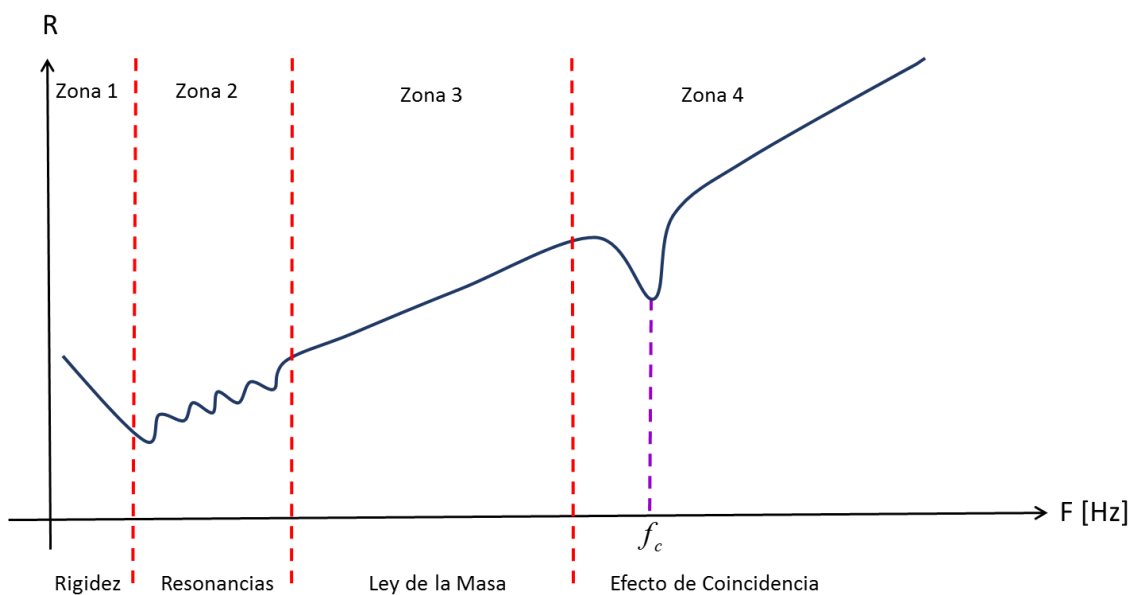


Figura 3.5-1 Índice de reducción acústica vs Frecuencias

- Zona 1 - Controlada por la rigidez de la partición

En el rango de baja frecuencia el aislamiento que presenta una partición está controlado básicamente por su rigidez s , cumpliéndose que a mayor rigidez, menor es el aislamiento a ruido aéreo, además decae 6 [dB] por octava, este comportamiento se mantiene por debajo de la frecuencia natural de la partición.

$$f_0 = \sqrt{\frac{s}{m_s}} \quad (3.5-4)$$

$f_0 \rightarrow$ Frecuencia natural de la partición

$s \rightarrow$ Rigidez de la partición por unidad de superficie

$m_s \rightarrow$ Densidad superficial

Para estas frecuencias menores a f_0 R se calcula mediante la siguiente expresión:

$$R = 20 \log(s) - 20 \log(f) - 74,2 \quad (3.5-5)$$

Para este caso R depende primordialmente de la rigidez de la pared, es independiente de la masa y el amortiguamiento. Este efecto normalmente

no se observa en las mediciones, ya que se presenta generalmente fuera del rango de interés, si se trata de un elemento muy ligero, esta ecuación ya no tendría validez. Por estas razones no se realizara el cálculo para esta zona.

- Zona 2 – Controlada por las resonancias del sistema

A partir de la frecuencia natural se presentan los modos propios de vibración de la partición, que dependen de su rigidez y de su densidad superficial, se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$f_{p,q} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} h c_L \left[\left(\frac{p}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{q}{L_y} \right)^2 \right] \quad (3.5-6)$$

Donde:

$h \rightarrow$ Espesor de la partición

$c_L \rightarrow$ Velocidad de onda longitudinal

p y $q \rightarrow$ Números enteros 1,2,3...

L_x y $L_y \rightarrow$ Dimensiones de la partición

Normalmente suele predominar el modo $f_{1,1}$ y a medida que los valores de L_x y L_y se hacen grandes se reduce su valor, siendo esta la frecuencia que marca la transición entre la zona controlada por los modos propios y la zona controlada por la masa.

- Zona 3 – Controlada por la masa

Para frecuencias superiores al doble de la $f_{1,1}$ hasta la mitad del valor de la frecuencia crítica f_c el aislamiento a ruido aéreo de la partición está controlado por la ley de la masa, en este caso se consideraran 3 situaciones específicas para incidencia normal, aleatoria y de campo.

- Incidencia normal:

Si se considera una partición infinita, sobre la cual inciden ondas sonoras planas y longitudinales la ley de la masa para esta será:

$$R_{(\theta=0)} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\pi f m_s}{\rho c} \right)^2 \right] [dB] \quad (3.5-7)$$

En los sistemas constructivos normalmente tienen una densidad superficial elevada por lo que $(\pi f m_s)^2 \gg (\rho c)^2$ entonces se puede simplificar la expresión, considerando que la pared no tiene rigidez y que no se disipa energía ni en la partición ni en el fluido que la rodea:

$$R_{(\theta=0)} \approx 20 \log(m_s f) - 42,4 [dB] \quad (3.5-8)$$

Para esta situación el índice de reducción acústica aumenta 6 dB cada vez que se duplica la masa o la frecuencia.

- Incidencia aleatoria

La expresión de la ley de la masa considerando el ángulo de incidencia es:

$$R_{\theta} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\pi f m_s \cos \theta}{\rho c} \right)^2 \right] [dB] \quad (3.5-9)$$

Para simplificar la expresión se considera que un recinto sobre la partición incide de forma aleatoria el campo acústico y tomar en cuenta todos los ángulos entre 0° y 90°:

$$R_{Aleatorio} \cong R_{(0)} - 10 \log[0.23 R_{(0)}] [dB] \quad (3.5-10)$$

- Incidencia de campo

En la práctica resulta más acertada una aproximación considerando ángulos entre 0° y 78°, para incidencia de campo:

$$R_{Campo} = R_{(0)} - 5 \approx 20 \log(m_s f) - 47,4 \quad (3.5-11)$$

- Zona 4 - Controlada por la coincidencia

Al medida que aumenta la frecuencia se llega a un punto donde el índice de reducción sonora estará controlado por el amortiguamiento y la rigidez de la partición provocando una caída en la curva predicha por la ley de la masa, este efecto se vuelve más pronunciado en la frecuencia de crítica,

y se manifiesta hasta una octava por sobre esta, dándose el efecto de coincidencia, que no es más que el momento en el que la longitud de onda de la incidente coincide con la longitud de onda de refracción.

La frecuencia de coincidencia es la primera frecuencia a la que se presenta el efecto de coincidencia, a partir de esta y dependiendo del ángulo de incidencia habrá una frecuencia de coincidencia distinta.

$$f_c = \frac{c^2}{1.8 \cdot h \cdot c_l} [Hz] \quad (3.5-12)$$

Donde:

$c \rightarrow$ Velocidad del sonido en el aire

$\rho \rightarrow$ Densidad

$E \rightarrow$ Modulo de Young.

$\nu \rightarrow$ Coeficiente de Polisión (1/3 para casos prácticos)

La frecuencia de coincidencia en función del ángulo ϕ de incidencia se obtiene mediante la expresión:

$$f_{Co} = \frac{f_c}{\sin^2 \phi} [Hz] \quad (3.5-13)$$

Para determinar el índice de reducción acústica en la banda de frecuencia donde se localiza la frecuencia de crítica se usa la siguiente expresión:

$$R = 20 \log(m_s f) + 10 \log \eta + 10 \log \left(\frac{\Delta f}{f_c} \right) - 44 [dB] \quad (3.5-14)$$

Donde:

$m_s \rightarrow$ Masa por unidad de superficie

$f \rightarrow$ Frecuencia

$\eta \rightarrow$ Factor de amortiguamiento

$\Delta f \rightarrow$ Ancho de banda (tercio y octava)

$f_c \rightarrow$ Frecuencia crítica

Para el cálculo de Δf , se utilizara la fórmula para bandas de tercio de octava que determinan su límite superior e inferior:

$$f_{inf} = \frac{f_n}{\sqrt[6]{2}} \quad (3.5-15)$$

$$f_{sup} = f_n \sqrt[6]{2} \quad (3.5-16)$$

Donde:

$f_n \rightarrow$ Frecuencia central de la banda de tercio de octava

$f_{inf} \rightarrow$ Frecuencia inferior de la banda de tercio de octava

$f_{sup} \rightarrow$ Frecuencia superior de la banda de tercio de octava

Finalmente para la zona por sobre la frecuencia crítica, se puede utilizar la expresión propuesta por Cremer den 1942⁴⁸:

$$R = 20 \log(m_s f) + 10 \log \eta + 10 \log \left(\frac{f}{f_c} - 1 \right) - 44 [dB] \quad (3.5-17)$$

Donde:

$m_s \rightarrow$ Masa por unidad de superficie

$f \rightarrow$ Frecuencia

$\eta \rightarrow$ Factor de pérdidas

$f_c \rightarrow$ Frecuencia crítica

⁴⁸ Fahy F. "Engineering Acoustics" pp 328

3.5.3. Aproximación al índice global de reducción acústica

Para realizar el cálculo del valor aproximado del índice global de reducción acústica, se utilizara las expresiones que aparecen en el anexo 3 “Aislamiento acústico de los elementos constructivos” del documento Norma Básica de la Edificación NBE-CA-88 “Condiciones Acústicas en los Edificios”, en su apartado 3.2-1 “Particiones interiores”:

- Si $m < 150 [\text{kg/m}^3]$

$$R = 16.6 \log m + 2 \text{ [dBA]} \quad (3.5-18)$$

- Si $m > 150 [\text{kg/m}^3]$

$$R = 36.5 \log m - 41.5 \text{ [dBA]} \quad (3.5-19)$$

Estas expresiones permiten hacer un cálculo aproximado del índice global de reducción acústica, considerando una partición simple, homogénea, o mampostería compuesta por materiales rígidamente unidos.

3.6. Evaluación De la incertidumbre

Para obtener una caracterización adecuada de los parámetros que se están evaluando, es importante realizar el cálculo de la incertidumbre asociada a la medida, lo que permitirá tener una caracterización de la dispersión de los valores que se podrían atribuir de manera razonable al parámetro que se está evaluando, estableciendo un rango donde estará el valor verdadero de la medición. Este parámetro permite la comparación de la medida con otros valores medidos o con valores de referencia como son los que aparecen en especificaciones o normas.

Dada la necesidad de que los valores sean comparables, existen una serie de normas generales para la evaluación y expresión de la incertidumbre de medida, que se encuentran en el documento “Guide to the expression of uncertainty in measurement”, en base al cual se realizaran los cálculos para las magnitudes medidas.

La incertidumbre de medida, se compone por los diferentes errores que se presentan durante la medición, que pueden ser aleatorios, sistemáticos no cuantificables, o debido a las correcciones aplicadas cuando se conocen los errores,

estos pueden ser ocasionados por fallas en el uso del equipo de medida, o durante el proceso de medición por parte del operador, también pueden factores ambientales, un muestreo poco representativo, o ser importadas al trabajar con parámetros que han sido medidos anteriormente, etc.

La incertidumbre se puede clasificar en dos grupos según la forma como se estima su valor:

- Tipo A.- se basa en el análisis de series de mediciones y se evalúa mediante procedimientos estadísticos.
- Tipo B.- Se basa en criterios no estadísticos, estos valores pueden ser obtenidos de certificados de calibración, especificaciones de los equipos, publicaciones, etc.

Para ambos casos se la evaluación se realiza en base a distribuciones de probabilidad, donde las componentes de incertidumbre serán las varianzas o desviaciones típicas, siendo la incertidumbre típica para una componente, el valor de la desviación estimada de los valores de esta.

3.6.1. Método de evaluación de la incertidumbre

3.6.1.1. Modelo de la medida

Generalmente el mensurando no se mide directamente, sino que se determina a través de otras magnitudes, siendo este una función de las magnitudes de entrada:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.6-1)$$

Cada magnitud de entrada, puede ser considerada mensurando, y pueden depender de otras magnitudes a su vez, además de acarrear correcciones, pudiendo llegar a ser una relación compleja, pudiendo llegar a ser difícil de expresar de forma explícita. De esto dependerá la forma como se estimara la incertidumbre.

3.6.1.1. Estimación de la incertidumbre para las magnitudes de entrada

Para la estimación de la incertidumbre, se consideraran dos casos, la incertidumbre tipo A y la incertidumbre tipo B.

- Tipo A.- Para realizar esta estimación se debe obtener la media aritmética del conjunto de medidas.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (3.6-2)$$

La varianza y la desviación típica experimental del conjunto de datos analizado representan su dispersión alrededor de la media, es decir su variación. Considerando esto, se utilizara la desviación típica de la media como estimador de incertidumbre $u(x_i)$.

$$\sigma^2(\bar{q}) = \frac{\sigma^2}{n} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \right) \quad (3.6-3)$$

- Tipo B.- Su valor se determinara según criterio y la experiencia de la persona que realiza la medición, para esto se debe considerar la información disponible, acerca de la variabilidad de la magnitud de entrada.

Se pueden considerar varios casos frecuentes:

- Conociendo la incertidumbre expandida de la componente.- para este caso se divide el valor para el factor de cobertura utilizado.

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (3.6-4)$$

- Conociendo la incertidumbre con intervalo de nivel de confianza.- aquí se asume distribución normal, y se divide la incertidumbre para el intervalo de confianza.

Nivel de confianza	Factor de cobertura
68,27	1
90	1,645
95	1,96
95,45	2
99	2,576
99,73	3

Tabla 3.6-1 Nivel de confianza y factor de cobertura

- Estimando límites de variación de la magnitud ($\pm a$).- Aquí se asume una distribución rectangular de probabilidad.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3.6-5)$$

- Cuando el tratamiento de los datos es muy complejo- en este caso según la que recomienda el documento de Eurolab "Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation" se puede utilizar como un estimador de la incertidumbre la reproducibilidad de intercomparación, dividiéndola para el factor de cobertura k.

$$U = s_R \quad (3.6-6)$$

Si no se cuenta con este dato, se puede recurrir a estudios realizados en condiciones similares donde se estime la incertidumbre del método.

3.6.1.1. Incertidumbre combinada

Una vez que se han estimado las incertidumbres se procede a aplicar la ley de propagación de incertidumbres.

- Magnitudes no correlacionadas.- Para este caso se debe considerar que cada incertidumbre típica estará afectada por el coeficiente de sensibilidad.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i * u(x_i)]^2} \quad (3.6-7)$$

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (3.6-8)$$

- Magnitudes de entrada correlacionadas.- Si existe una correlación significativa, esta debe ser tomada en cuenta a través de las covarianzas.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=n}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)} \quad (3.6-9)$$

3.6.1.1. Incertidumbre expandida

Finalmente para obtener el valor de la incertidumbre de medida se la multiplica por el factor de cobertura que garantiza un nivel de confianza.

$$U = k * u_c \quad (3.6-10)$$

4 Resultados

4.1. Recepción de las muestras

Una recibidos los paquetes, se comprueba que las muestras hayan llegado en buen estado, cada set que se ha recibido está compuesto por un ladrillo artesanal de $20 \times 15 \times 8 \text{ cm}^3$, un ladrillo industrial de $20 \times 10 \times 4 \text{ cm}^3$ y la mitad de un ladrillo artesanal de los de $30 \times 15 \times 10 \text{ cm}^3$.

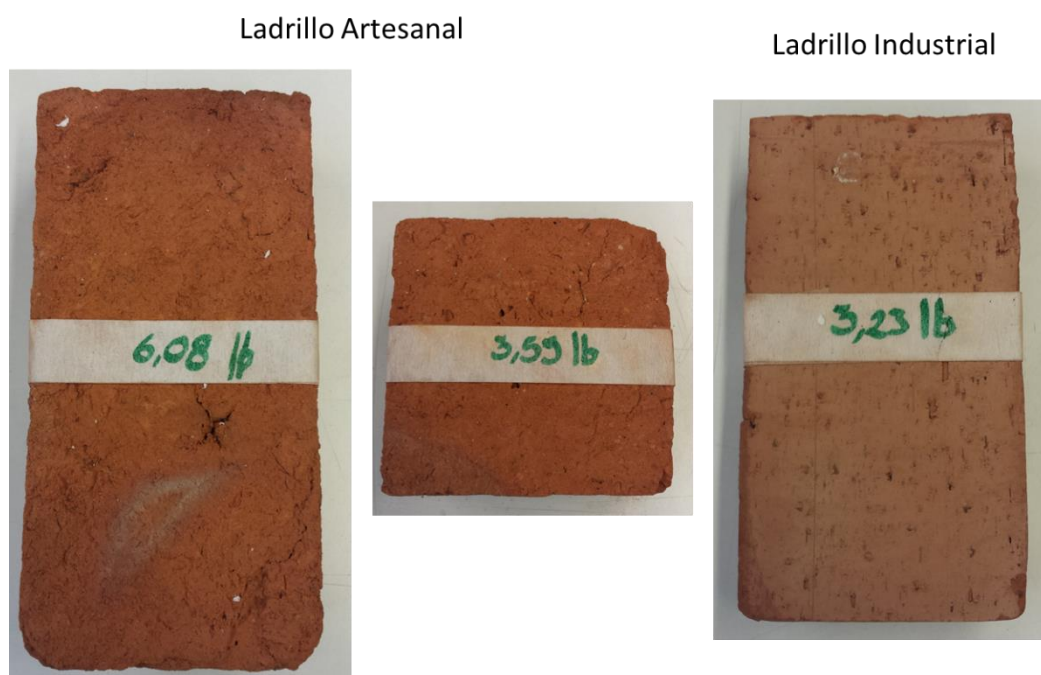


Figura 4.1-1 Set de muestras

Desde el lugar de origen cada muestra ha venido marcada con su peso en libras, ya que esta es la unidad que utilizan los productores artesanales.

En total se tienen:

- 2 mitades de 1 ladrillo artesanal de aproximadamente $30 \text{ cm} \times 13 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$
- 2 ladrillos artesanales enteros de aproximadamente $23 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 7.5 \text{ cm}$
- 2 ladrillos artesanales de aproximadamente $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$

Adicionalmente se trajo una muestra pequeña que es básicamente la mitad de un ladrillo tipo jaboncillo.

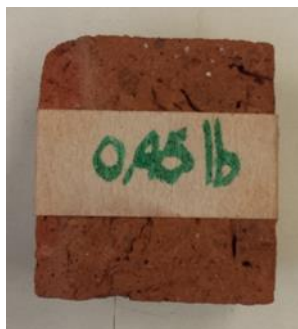


Figura 4.1-2 Muestra de ladrillo extra

4.2. Dimensiones y densidad

Se debe considerar antes de realizar la medición de los ladrillos que las dimensiones aportadas por el fabricante son referenciales ya que debido a lo rudimentario del proceso de fabricación artesanal, no siempre se cumplen.

4.2.1. Dimensiones y cálculo del volumen

Para obtener los valores de las dimensiones y la densidad se realizaron las mediciones según el esquema planteado, tomando 7 medidas de cada dimensión en cada cara.

La medida se la realizó con una regla y un flexómetro, por esta razón se la presenta en cm.

El cálculo del volumen se lo realiza con la expresión 3.2-2.

- Ladrillo artesanal 01

El ladrillo artesanal 01 es el que vino dividido en 2 parte, una en cada envío, las dimensiones de este ladrillo son aproximadamente: $30 \times 15 \times 8$ [cm³].

La variación de las medidas se debe a que durante el proceso de producción el molde de madera se va desgastando, además durante el corte también se pierde material.

○ Mitad 1

Dimensiones ladrillo artesanal 01- Mitad 1												
	Largo [cm]				Ancho [cm]				Alto [cm]			
	A	B	1	3	A	B	2	4	1	2	3	4
M1	12,8	12,7	13,2	12,8	12,9	12,7	12,8	12,6	7,9	7,6	7,7	7,7
M2	12,7	12,8	13,8	12,7	12,8	12,5	12,8	12,7	7,7	7,6	7,7	7,8
M3	12,6	12,7	13,8	12,8	12,8	12,6	12,7	12,6	7,7	7,7	7,7	8,0
M4	12,8	12,7	13,1	12,8	12,8	12,6	12,7	12,7	7,8	7,7	7,7	7,7
M5	12,8	12,6	13,1	12,8	12,9	12,6	12,6	12,8	7,9	7,7	7,7	7,8
M6	12,8	12,6	13,1	12,8	12,9	12,6	12,5	12,8	7,9	7,7	7,6	7,8
M7	12,8	12,5	13,0	12,6	12,8	12,6	12,5	12,8	7,7	7,9	7,6	7,7
Promedio	12,9				12,7				7,7			

Tabla 4.2-1 Resultados - Dimensiones ladrillo artesanal 01 - Mitad 1

○ Mitad 2

Dimensiones ladrillo artesanal 01- Mitad 2												
	Largo [cm]				Ancho [cm]				Alto [cm]			
	A	B	1	3	A	B	2	4	1	2	3	4
M1	12,8	12,8	12,6	13,0	12,6	12,8	12,7	12,5	8,1	8,3	8,0	8,0
M2	12,7	13,4	12,8	13,1	12,5	13,0	12,8	12,6	8,1	8,2	7,9	8,1
M3	12,8	13,5	12,9	13,1	12,6	13,0	12,9	12,7	8,0	8,3	8,0	8,0
M4	12,6	13,5	12,9	13,2	12,6	13,1	12,8	12,7	8,0	8,3	8,1	8,0
M5	12,5	13,4	13,1	13,1	12,6	13,1	12,7	12,8	8,0	8,2	8,1	7,9
M6	13,1	12,8	12,7	13,0	12,5	12,9	12,7	12,6	7,9	8,2	7,8	7,9
M7	12,6	13,4	13,0	13,2	12,5	13,1	12,6	12,7	8,0	8,3	8,1	7,9
Promedio	13,0				12,7				8,1			

Tabla 4.2-2 Resultados - Dimensiones ladrillo artesanal 01 - Mitad 2

● Ladrillo Artesanal 02

Dimensiones ladrillo artesanal 02												
	Largo [cm]				Ancho [cm]				Alto [cm]			
	A	B	1	3	A	B	2	4	1	2	3	4
M1	23,7	23,6	23,5	23,5	11,6	11,6	11,6	11,8	7,2	7,1	7,7	7,2
M2	23,3	23,5	23,7	23,4	11,5	11,5	11,6	11,8	7,1	7,1	7,7	7,2
M3	23,6	23,6	23,8	23,7	11,7	11,6	11,7	11,8	7,4	7,1	7,7	7,3
M4	23,7	23,6	23,6	28,7	11,8	11,7	11,7	11,9	7,4	7,3	7,7	6,8
M5	23,7	23,7	23,6	23,7	11,9	11,7	11,7	11,9	7,4	7,4	7,6	6,8
M6	23,8	23,6	23,7	23,7	11,8	11,7	11,6	11,8	7,5	7,5	7,6	7,0
M7	23,7	23,5	23,7	23,3	12,3	11,8	11,6	11,8	7,8	7,5	7,6	6,9
Promedio	23,8				11,7				7,3			

Tabla 4.2-3 Resultados - Dimensiones ladrillo artesanal 02

- Ladrillo artesanal 03

	Dimensiones ladrillo artesanal 03											
	Largo [cm]				Ancho [cm]				Alto [cm]			
	A	B	1	3	A	B	2	4	1	2	3	4
M1	26,7	25,8	25,8	25,9	13,1	13,0	13,3	13,1	7,0	7,2	7,2	7,4
M2	25,3	25,7	25,9	25,8	13,4	13,1	13,3	13,2	7,9	7,3	7,5	7,5
M3	25,7	25,7	25,7	26,0	13,4	13,2	13,3	13,3	7,7	7,4	7,6	7,4
M4	26,0	25,8	25,4	25,9	13,3	13,1	13,1	13,2	7,6	7,7	7,5	7,6
M5	25,7	25,6	25,7	26,0	13,4	13,2	13,3	13,3	7,5	7,6	7,4	7,5
M6	25,6	25,5	25,7	25,6	13,2	13,1	13,3	13,1	7,5	7,3	7,6	7,3
M7	25,6	25,5	25,7	25,7	13,1	13,0	13,3	13,1	7,5	7,5	7,5	7,2
Promedio	25,8				13,2				7,5			

Tabla 4.2-4 Resultados - Dimensiones ladrillo artesanal 03

- Ladrillo industrial 01

	Dimensiones ladrillo industrial 01											
	Largo [cm]				Ancho [cm]				Alto [cm]			
	A	B	1	3	A	B	2	4	1	2	3	4
M1	18,5	18,6	18,7	18,8	10,1	10,1	10,1	10,1	4,2	4,2	4,2	4,2
M2	18,6	18,6	18,4	18,6	10,1	10,1	10,1	10,1	4,2	4,2	4,2	4,2
M3	18,5	18,7	18,5	18,6	10,1	10,1	10,2	10,1	4,2	4,2	4,3	4,2
M4	18,5	18,7	18,5	18,7	10,2	10,1	10,2	10,2	4,2	4,2	4,2	4,3
M5	18,6	18,6	18,5	18,6	10,2	10,2	10,2	10,2	4,2	4,2	4,2	4,2
M6	18,6	18,5	18,6	18,6	10,2	10,1	10,2	10,1	4,1	4,2	4,2	4,2
M7	18,7	18,5	18,5	18,5	10,2	10,1	10,1	10,1	4,1	4,2	4,2	4,2
Promedio	18,6				10,1				4,2			

Tabla 4.2-5 Resultados - Dimensiones ladrillo industrial 01

- Ladrillo Industrial 02

	Dimensiones ladrillo industrial 02											
	Largo [cm]				Ancho [cm]				Alto [cm]			
	A	B	1	3	A	B	2	4	1	2	3	4
M1	21,6	21,0	20,7	21,3	10,4	10,5	10,4	10,4	4,2	4,2	4,1	4,1
M2	21,5	20,6	20,9	21,3	10,6	10,5	10,3	10,4	4,3	4,2	4,2	4,1
M3	20,5	21,8	20,4	20,3	10,6	10,5	10,3	10,5	4,2	4,2	4,2	4,1
M4	20,8	21,6	20,8	20,7	10,5	10,5	10,4	10,4	4,3	4,2	4,1	4,1
M5	20,8	21,5	20,7	20,8	10,4	10,6	10,6	10,4	4,1	4,2	4,2	4,2
M6	20,7	20,6	21,6	20,3	10,5	10,7	10,5	10,5	4,2	4,2	4,1	4,2
M7	20,8	20,7	21,6	20,6	10,7	10,6	10,6	10,3	4,2	4,2	4,2	4,1
Promedio	20,9				10,5				4,2			

Tabla 4.2-6 Resultados - Dimensiones ladrillo industrial 02

Como se puede observar en la siguiente tabla que existen algunas discrepancias en las dimensiones de los ladrillos artesanales a pesar de que son del mismo tipo, esto se debe a que la producción artesanal no tiene un control de calidad adecuado, además durante el proceso de envío pudieron haberse golpeado y perdido material causando mayores irregularidades en su geometría. Esto también se observa en el ladrillo industrial, pero en este caso por su dureza es poco probable que se haya maltratado durante el viaje, pero si ser un descuido en control de calidad la discrepancia de medidas.

También se tienen los valores del volumen para cada ladrillo, este valor será de utilidad para el cálculo de la densidad.

			Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]	Volumen [m³]
Ladrillo Artesanal	01	M1	0,129	0,127	0,077	1,26E-03
		M2	0,130	0,127	0,081	1,34E-03
	02		0,238	0,117	0,073	2,03E-03
	03		0,258	0,132	0,075	2,55E-03
Ladrillo Industrial	01		0,186	0,101	0,042	7,90E-04
	02		0,209	0,105	0,042	9,20E-04

Tabla 4.2-7 Resultados Dimensiones y volumen

4.2.2. Peso, cálculo de la densidad y de la masa por unidad de superficie

Una vez medidas las muestras, se procede a pesarlas para el posterior cálculo del volumen con la ecuación 3.2-2 y de la densidad mediante la expresión 3.2-3, este dato se utilizó para la medición del coeficiente de transmisión térmica.

Se realizaron 3 medidas del peso para cada muestra, y en todos los casos se obtuvo el mismo valor sin ninguna variación.



Figura 4.2-1 Pesado de muestra

- Ladrillo artesanal

			Peso [Kg]	Volumen [m³]	Densidad [kg/m³]
Ladrillo Artesanal	01	M1	1,62	1,26E-03	1286
		M2	1,72	1,34E-03	1284
	02		2,76	2,03E-03	1360
	03		3,30	2,55E-03	1294
Promedio					1306

Tabla 4.2-8 Resultados - Volumen, peso y densidad - Ladrillo artesanal

- Ladrillo industrial

			Peso [Kg]	Volumen [m ³]	Densidad [kg/m ³]
Ladrillo Industrial	01		1,470	7,90E-04	1861
	02		1,730	9,20E-04	1880
Promedio					1871

Tabla 4.2-9 Resultados - Volumen, peso y densidad - Ladrillo industrial

Comparando los resultados de densidad obtenidos con los valores del Catálogo de elementos constructivos del CTE de marzo del 2010 para el ladrillo macizo LM de ½ pie y de 1 pie, los ladrillos artesanales tienen una densidad bastante menor, y el ladrillo industrial si bien es más denso, aún sigue estando por debajo.

Fábrica de ladrillo cerámico		
Ladrillo macizo LM	Espesor de fábrica E mm	ρ kg/m ³
1/2 pie	115 ó 130	2170
1 pie	240 ó 280	2170

Tabla 4.2-10 Densidad para fábrica de ladrillo cerámico macizo – CTE

Si se considera una pared hecha de ladrillos, aproximadamente entre el 10% y el 15% será mortero y el resto ladrillo dependiendo del tipo de aparejo que se utilice, haciendo esta consideración la densidad varía de la siguiente manera, suponiendo que se utiliza un mortero de densidad similar al propuesto en el Catálogo de elementos constructivos CTE y un mortero más denso como el que se suele utilizar en Ecuador:

			Densidad [kg/m ³]		
			Ladrillo solo	Mortero 1	Mortero 2
				ρ [kg/m ³] 1900	ρ [kg/m ³] 2100
Ladrillo Artesanal	01	M1	1286	1347	1367
		M2	1284	1346	1366
	02		1360	1414	1434
	03		1294	1355	1375
	Promedio		1306	1366	1386

Tabla 4.2-11 Resultados - Densidad pared de ladrillo artesanal⁴⁹

		Densidad [kg/m³]		
		Ladrillo solo	Mortero 1	Mortero 2
			ρ [kg/m³] 1900	ρ [kg/m³] 2100
Ladrillo Industrial	01	1861	1865	1885
	02	1880	1882	1902
Promedio		1871	1874	1894

Tabla 4.2-12 Resultados - Densidad pared de ladrillo industrial⁵⁰

⁴⁹ El cálculo se realizó considerando que la proporción de mortero será 10%.

⁵⁰ El cálculo se realizó considerando que la proporción de mortero será 10%.

En la tabla se puede observar que la densidad de las paredes de ladrillo utilizando tanto el mortero propuesto en el catálogo técnico de la edificación (mortero 1) como el que se usa comúnmente en Ecuador (mortero 2), comparando con los valores del catálogo técnico de la edificación, siguen siendo considerablemente más livianas.

El cálculo de la masa por unidad de superficie se lo ha realizado considerando que el volumen calculado para cada muestra corresponde al de un cubo homogéneo, entonces para obtener una de sus dimensiones sacamos la raíz cúbica del volumen, con este valor al multiplicarlo por la densidad volumétrica, obtendremos la densidad superficial.

			Masa por unidad de superficie [kg/m ²]		
			Ladrillo solo	Mortero 1	Mortero 2
				ρ [kg/m ³] 1900	ρ [kg/m ³] 2100
Ladrillo Artesanal	01	M1	139	145	148
		M2	142	148	151
	02		172	179	182
	03		177	185	188
Promedio			158	165	167

Tabla 4.2-13 Resultados - Masa por unidad de superficie – Ladrillo artesanal

		Masa por unidad de superficie [kg/m ²]		
		Ladrillo solo	Mortero 1	Mortero 2
			ρ [kg/m ³]	ρ [kg/m ³]
			1900	2100
Ladrillo Industrial	01	172	172	174
	02	183	183	185
Promedio		178	178	180

Tabla 4.2-14 Resultados - Masa superficial - Ladrillo industrial

4.3. Coeficiente de transmisión térmica y Resistencia térmica

Una vez determinadas las dimensiones de las muestras se procede a realizar la evaluación de sus propiedades térmicas utilizando la unidad medidora de calor. Para este efecto se aplano la superficie de los ladrillos artesanales ya que presentaban una geometría irregular y eso dificultaba el realizar esta evaluación.



Figura 4.3-1 Ladrillo con sus superficies aplanadas

Según las especificaciones de la unidad medidora de calor, las muestras deben tener máximo 10cm de alto, y medir 30cm x 30cm, respecto al alto no hubo ningún inconveniente, pero respecto al largo y ancho no cumplían con el tamaño estipulado, así que se realizó las mediciones para los ladrillos enteros utilizando un marco de un material previamente evaluado, de baja transmisión térmica.

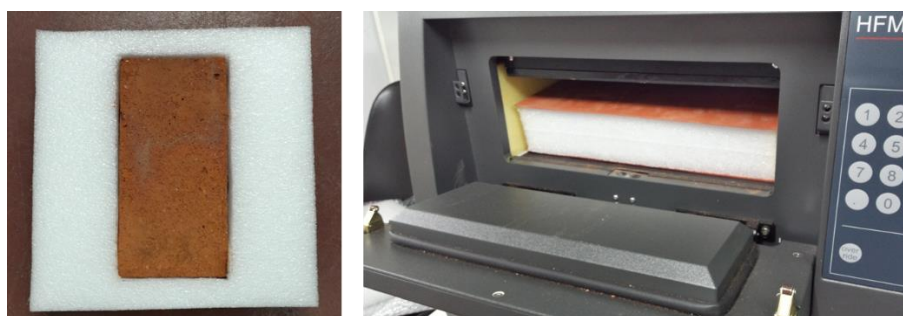


Figura 4.3-2 Evaluación de la transmisión térmica – Ladrillo artesanal

Se evaluaron únicamente las muestras enteras, ya que presentaban mayor superficie y los resultados serían más fiables, además de que por su grosor facilitaban la colocación de los protectores de caucho, garantizando así un buen funcionamiento de la unidad.

- Ladrillo artesanal

A simple vista se puede observar que hay diferencias en la calidad de las muestras de ladrillo artesanal, su coloración y consistencia es diferente, sobre todo en los ladrillos completos, mientras el artesanal 02 muestra imperfecciones más grandes y una coloración más pálida, el artesanal 03 es tiene un color más intenso y su apariencia es más lisa y maciza, por lo que era posible que presenten diferencias en sus propiedades respecto a la transmisión de calor.

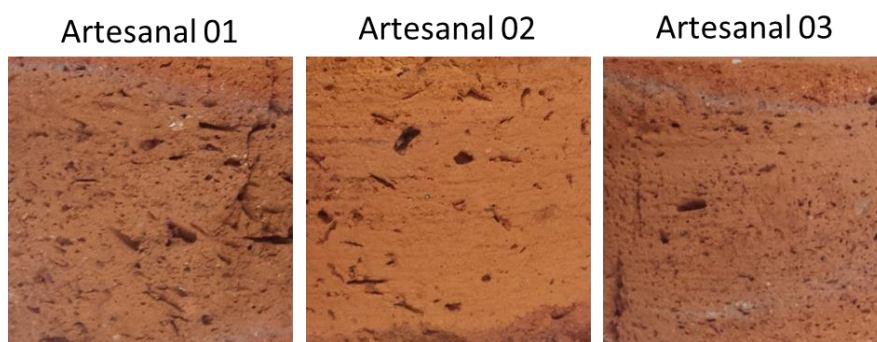


Figura 4.3-3 Diferencia de calidad - Ladrillo artesanal

Conductividad térmica					
Temperatura media		Artesanal 02		Artesanal 03	
Delta (Aproximada)	Temperatura °C (Aproximada)	M1	M2	M1	M2
10,00	20,00	0,24	0,26	0,21	0,25
15,00		0,25	0,24	0,22	0,22
20,00		0,26	0,24	0,22	0,22
25,00		0,26	0,23	0,22	0,23
30,00		0,27	0,22	0,22	0,22
35,00		0,28	0,28	0,22	0,21
40,00		0,25	0,25	0,23	0,23
45,00		0,27	0,24	0,23	0,23
Promedio	Medición	0,26	0,24	0,22	0,23
	Muestra	0,25		0,22	
	General	0,24			

Tabla 4.3-1 Resultados Conductividad térmica - Ladrillo artesanal

Como se puede observar en la tabla 4.3.1, los resultados respecto a la conductividad térmica, existe una pequeña diferencia entre ambos, debido a las evidentes diferencias de calidad entre ambos.

Respecto a la resistencia térmica, los valores presentan diferencias sustanciales entre sí, siendo más alta la resistencia térmica del ladrillo artesanal 3.

Resistencia térmica					
Temperatura media		Artesanal 02		Artesanal 03	
Delta (Aproximada)	Temperatura °c (Aproximada)	M1	M2	M1	M2
10,00	20,00	0,29	0,27	0,35	0,30
15,00		0,28	0,30	0,34	0,34
20,00		0,28	0,30	0,34	0,34
25,00		0,27	0,31	0,34	0,34
30,00		0,26	0,32	0,33	0,34
35,00		0,26	0,29	0,33	0,36
40,00		0,28	0,29	0,33	0,32
45,00		0,27	0,30	0,33	0,33
Promedio	Medición	0,27	0,30	0,34	0,33
	Muestra	0,28		0,34	
	General	0,31			

Tabla 4.3-2 Resistencia térmica - Ladrillo artesanal

- Ladrillo Industrial

El ladrillo industrial presenta diferencias de color y acabado aún más evidentes que en el caso del artesanal.

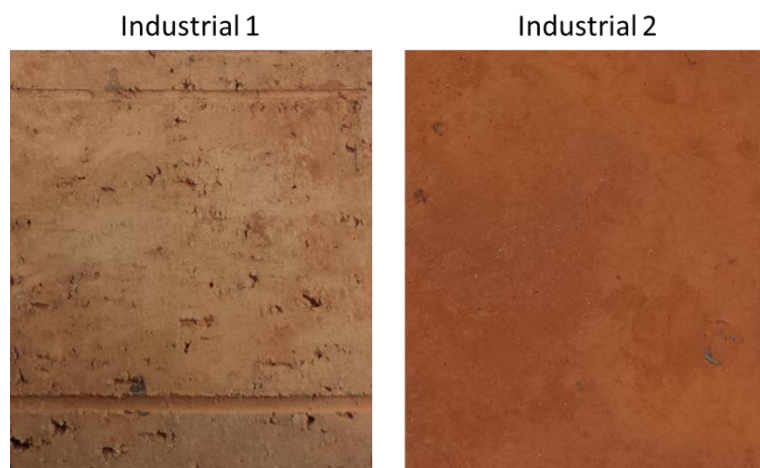


Figura 4.3-4 Diferencia de calidad - Ladrillo industrial

Debido a las marcadas diferencias en los ladrillos, se esperaba como se confirma en las tablas un comportamiento térmico distinto presentando una conductividad térmica el primer ladrillo, mismo que presenta una dureza superior y betas de tipo metálico en su interior.

Conductividad térmica				
Temperatura media		Industrial 01	Industrial 02	
Delta (Aproximada)	Temperatura °C (Aproximada)	M1	M1 (con termopar)	M2
10,00	20,00	0,70	0,44	0,56
15,00		0,71	0,55	0,57
20,00		0,70	0,56	0,58
25,00		0,70	0,57	0,59
30,00		0,70	0,59	0,59
35,00		0,70	0,59	0,57
40,00		0,70	0,56	0,59
45,00		0,71	0,59	0,61
Promedio	Medición	0,70	0,56	0,58
	Muestra	0,70	0,57	

Tabla 4.3-3 Conductividad térmica - Ladrillo industrial

Resistencia térmica				
Temperatura media		Industrial 01	Industrial 02	
Delta (Aproximada)	Temperatura °C (Aproximada)	M1	M1 (con termopar)	M2
10,00	20,00	0,06	0,08	0,07
15,00		0,06	0,08	0,07
20,00		0,06	0,07	0,07
25,00		0,06	0,07	0,07
30,00		0,06	0,07	0,07
35,00		0,06	0,07	0,07
40,00		0,06	0,07	0,07
45,00		0,06	0,08	0,07
Promedio	Medición	0,06	0,08	0,07
	Muestra	0,06	0,07	
	General	0,07		

Tabla 4.3-4 Resistencia térmica - Ladrillo industrial

4.4. Coeficiente de absorción acústica

Para la evaluación del coeficiente de absorción acústica se decidió probar dos métodos, el de la sonda de impedancia y el del tubo de impedancia, lo que permitió aparte de evaluar las características de las muestras, comprobar la efectividad de ambos métodos, sus limitaciones.

4.4.1. Método de sonda de impedancia

El método de la sonda de impedancia, es un método nuevo enfocado al plano más práctico para la realización de mediciones de campo, la idea en este caso es aplicar el método para evaluar muestras pequeñas y comprobar cómo influye el medio que le rodea.

Para este propósito se utilizaron una muestra de ladrillo industrial, y del ladrillo artesanal una de cada tamaño. Las mediciones se realizaron utilizando el siguiente esquema de medida, utilizando distancias de 0.5 cm y 1 cm:

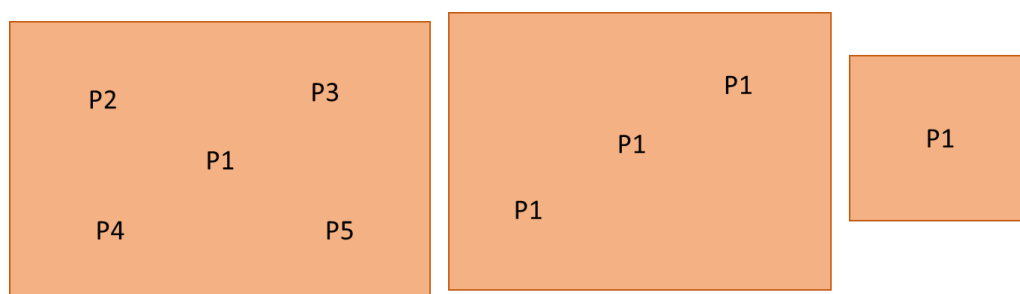


Figura 4.4-1 Esquema de mediciones para técnica de sonda de impedancia

A medida que se realizaban las mediciones se observó que había una cantidad considerable de valores negativos, y que en el rango entre 160 y 1600 los valores obtenidos eran algo más coherentes, y además se observaron variaciones importantes debido a la influencia del tamaño de las muestras y el medio que las rodeaba por lo que los resultados al final no resultaron fiables, por lo que se realizó únicamente las mediciones para confirmar estos efectos.

4.4.1.1. Resultados Mediciones

- Ladrillo artesanal 01

Solo se midió un lado rodeado de lana de vidrio.



Figura 4.4-2 Ladrillo artesanal 01 - Lana de vidrio - Sonda de impedancia

Coeficiente de absorción - Ladrillo artesanal 01										
f [HZ]	d=0,5 [cm]					d=1 [cm]				
	P01	P02	P03	P04	P05	P01	P02	P03	P04	P05
100	0,503	0,260	0,311	0,225	0,314	0,486	0,151	0,133		0,204
125	0,172	0,133	0,113	0,144	0,158	0,186	0,058	0,081		0,076
160	0,142	0,109	0,085	0,089	0,115	0,137	0,058	0,069	0,137	0,060
200	0,103	0,116	0,078	0,082	0,061	0,103	0,070	0,071	0,130	0,035
250	0,093	0,114	0,113	0,147	0,103	0,113	0,086	0,128	0,186	0,103
315	0,177	0,205	0,205	0,256	0,193	0,244	0,219	0,263	0,298	0,241
400	0,266	0,341	0,291	0,391	0,284	0,381	0,391	0,401	0,465	0,383
500	0,276	0,377	0,346	0,469	0,323	0,408	0,437	0,470	0,550	0,441
630	0,272	0,390	0,326	0,492	0,324	0,411	0,453	0,471	0,593	0,454
800	0,252	0,375	0,276	0,460	0,294	0,372	0,434	0,417	0,556	0,419
1000	0,211	0,333	0,237	0,405	0,251	0,310	0,382	0,363	0,490	0,358
1250	0,172	0,286	0,200	0,356	0,218	0,250	0,323	0,306	0,431	0,308
1600	0,105	0,220	0,146	0,280	0,180	0,148	0,241	0,223	0,335	0,245
2000	-0,016	0,103	0,083	0,156	0,137	-0,057	0,101	0,101	0,196	0,160
2500	-0,157	-0,056	0,063	0,065	0,124	-0,414	-0,062	0,041	0,021	0,120
3150	-0,471	-0,143	0,055	-0,040	0,129	-1,213	-0,191	0,031	-0,045	0,129
4000	-0,613	-0,186	-0,026	-0,121	0,037	-1,271	-0,280	-0,138	-0,172	-0,029
5000	0,270	-0,552	-0,506	-0,404	-0,281	0,515	-1,059	-1,099	-0,433	-0,560

Tabla 4.4-1 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo Artesanal 01

- Ladrillo artesanal 02

Se lo evaluó rodeado de lana de vidrio

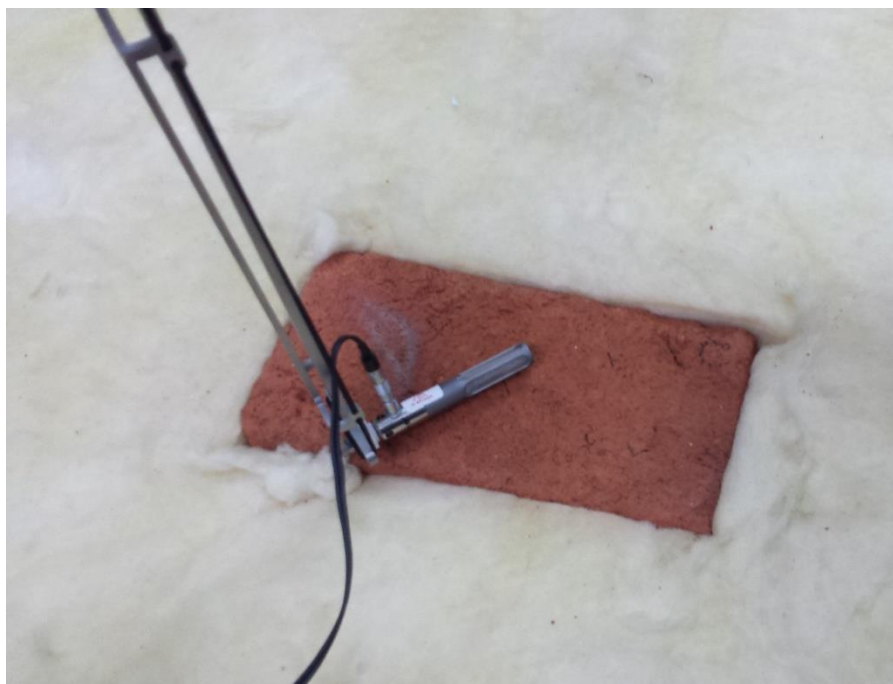


Figura 4.4-3 Resultados sonda de impedancia - Lana de vidrio - Sonda de impedancia.

Coeficiente de absorción - Ladrillo artesanal 02										
d=0,5cm										
f [HZ]	A01	A02	A03	A04	A05	B01	B02	B03	B04	B05
100	0,827	0,701	0,725	0,667	0,594	0,564	0,609	0,514	0,563	0,452
125	0,240	0,278	0,235	0,205	0,180	0,208	0,238	0,174	0,191	0,183
160	0,095	0,101	0,133	0,151	0,117	0,142	0,185	0,175	0,109	0,175
200	0,061	0,051	0,070	0,100	0,085	0,098	0,044	0,132	0,071	0,169
250	0,064	0,047	0,057	0,111	0,085	0,112	0,038	0,111	0,081	0,184
315	0,134	0,103	0,132	0,203	0,168	0,188	0,122	0,211	0,148	0,298
400	0,180	0,156	0,178	0,261	0,236	0,248	0,227	0,277	0,186	0,428
500	0,196	0,187	0,205	0,279	0,263	0,265	0,218	0,315	0,179	0,490
630	0,185	0,201	0,208	0,254	0,255	0,249	0,218	0,313	0,149	0,495
800	0,150	0,186	0,186	0,203	0,213	0,203	0,196	0,280	0,110	0,444
1000	0,110	0,155	0,155	0,152	0,161	0,155	0,160	0,237	0,088	0,382
1250	0,072	0,125	0,132	0,104	0,113	0,108	0,124	0,198	0,089	0,324
1600	0,026	0,102	0,117	0,048	0,073	0,056	0,092	0,166	0,102	0,291
2000	-0,037	0,081	0,094	-0,038	0,020	-0,004	0,046	0,120	0,088	0,259
2500	-0,039	0,067	0,089	-0,120	-0,061	-0,027	-0,038	0,053	0,042	0,239
3150	-0,083	0,121	0,123	-0,131	-0,072	-0,039	-0,032	0,076	0,028	0,309
4000	-0,319	0,156	0,074	0,108	0,082	-0,114	0,044	0,188	0,035	0,322
5000	0,133	-0,055	-0,094	-0,047	-0,112	0,404	-0,006	0,242	-0,037	0,217

Tabla 4.4-2 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo artesanal 02 d=0.5 [cm]

Coeficiente de absorción - Ladrillo artesanal 02										
d=1cm										
f [HZ]	A01	A02	A03	A04	A05	B01	B02	B03	B04	B05
100	0,405	0,354	0,623	0,447	0,382	0,388	0,437	0,396	0,383	0,394
125	0,167	0,141	0,199	0,152	0,131	0,155	0,135	0,155	0,141	0,191
160	0,124	0,099	0,125	0,138	0,116	0,142	0,099	0,137	0,118	0,190
200	0,096	0,089	0,073	0,106	0,107	0,115	0,080	0,107	0,091	0,192
250	0,114	0,105	0,070	0,124	0,128	0,143	0,097	0,123	0,121	0,223
315	0,250	0,230	0,220	0,268	0,267	0,266	0,214	0,281	0,252	0,372
400	0,335	0,334	0,298	0,358	0,382	0,361	0,331	0,382	0,351	0,548
500	0,375	0,393	0,349	0,400	0,433	0,398	0,378	0,428	0,389	0,632
630	0,363	0,406	0,353	0,376	0,426	0,379	0,388	0,423	0,369	0,649
800	0,304	0,363	0,316	0,310	0,363	0,313	0,340	0,374	0,312	0,595
1000	0,231	0,295	0,260	0,238	0,283	0,239	0,269	0,309	0,258	0,521
1250	0,149	0,225	0,213	0,160	0,200	0,156	0,200	0,249	0,218	0,445
1600	0,043	0,170	0,176	0,072	0,134	0,050	0,140	0,193	0,198	0,399
2000	-0,113	0,123	0,106	-0,078	0,042	-0,124	0,045	0,089	0,128	0,351
2500	-0,081	0,095	0,038	-0,292	-0,132	-0,116	-0,128	-0,059	-0,055	0,312
3150	-0,072	0,189	0,061	-0,287	-0,170	-0,126	-0,177	-0,179	-0,118	0,401
4000	-0,207	0,260	-0,011	0,120	0,067	-0,292	-0,010	0,092	-0,094	0,401
5000	-0,093	-0,187	-0,243	-0,083	-0,077	0,559	-0,021	0,305	-0,247	0,231

Tabla 4.4-3 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo artesanal 02 d=1 [cm]

- Ladrillo artesanal 04 (Ladrillo pequeño)

En este caso por su tamaño solo se utilizó un punto en cada cara.

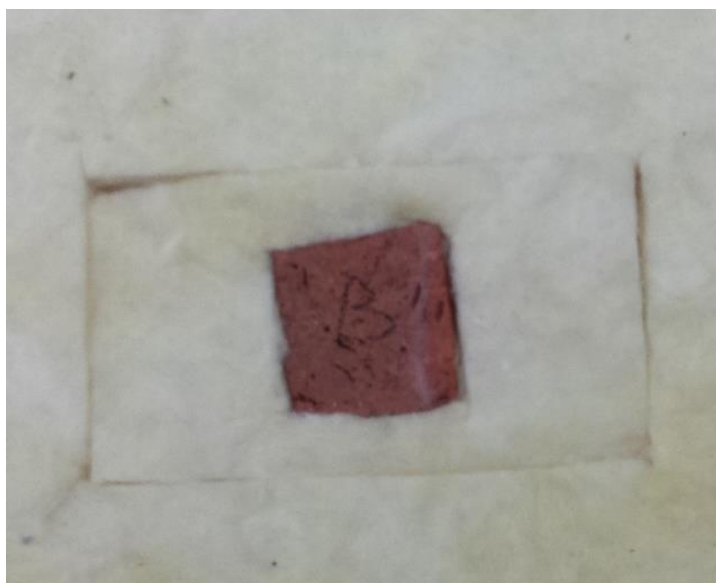


Figura 4.4-4 Ladrillo artesanal 04 - Sonda de impedancia

Coefficiente de absorción - Ladrillo Artesanal 04				
f [HZ]	0,5 [cm]		1 [cm]	
	A01	B01	A01	B01
100	0,098	0,119	0,006	0,093
125	0,028	0,008	-0,064	-0,046
160	0,058	0,020	-0,019	-0,020
200	0,095	0,021	0,034	-0,020
250	0,137	0,051	0,095	0,040
315	0,364	0,235	0,357	0,281
400	0,552	0,403	0,576	0,491
500	0,644	0,488	0,682	0,596
630	0,687	0,543	0,734	0,664
800	0,672	0,537	0,721	0,659
1000	0,626	0,496	0,673	0,612
1250	0,595	0,464	0,639	0,575
1600	0,593	0,458	0,639	0,571
2000	0,597	0,448	0,645	0,563
2500	0,527	0,378	0,566	0,475
3150	0,418	0,279	0,433	0,333
4000	0,266	0,174	0,214	0,165
5000	-0,082	-0,002	-0,447	-0,238

Tabla 4.4-4 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo artesanal 04

- Ladrillo industrial 01 – Rodeado de lana de vidrio

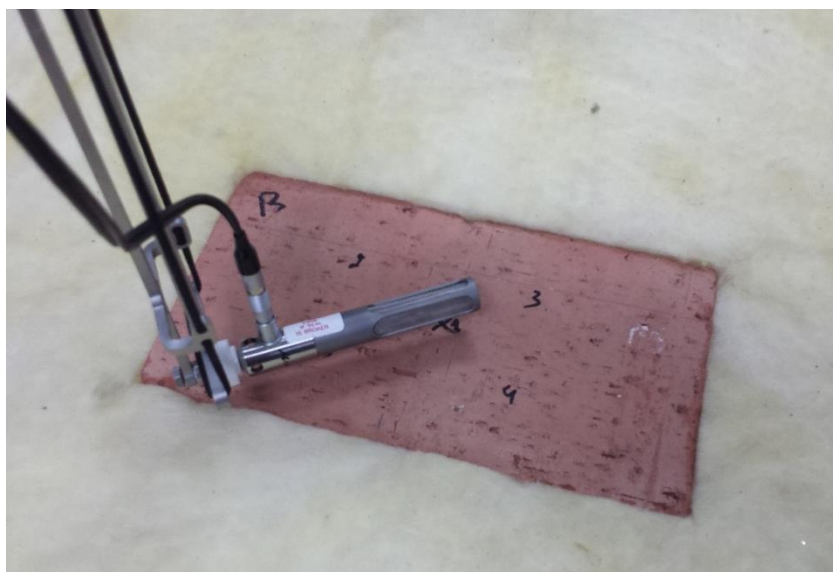


Figura 4.4-5 Ladrillo Industrial 01 - Lana de vidrio - Sonda de impedancia

Coeficiente de absorción - Ladrillo industrial 01										
d=0,5cm										
f [HZ]	A01	A02	A03	A04	A05	B01	B02	B03	B04	B05
100	0,548	0,647	0,664	0,560	0,571	0,603	0,498	0,515	0,490	0,604
125	0,191	0,175	0,168	0,167	0,176	0,202	0,162	0,175	0,194	0,176
160	0,117	0,097	0,103	0,099	0,087	0,112	0,081	0,107	0,113	0,088
200	0,120	0,095	0,117	0,109	0,090	0,110	0,084	0,095	0,114	0,087
250	0,120	0,094	0,121	0,120	0,085	0,109	0,081	0,103	0,119	0,093
315	0,214	0,193	0,230	0,225	0,178	0,206	0,182	0,211	0,224	0,195
400	0,312	0,312	0,363	0,319	0,262	0,308	0,312	0,352	0,327	0,291
500	0,358	0,375	0,433	0,354	0,298	0,351	0,385	0,423	0,368	0,339
630	0,350	0,390	0,442	0,337	0,294	0,348	0,412	0,436	0,362	0,343
800	0,290	0,347	0,391	0,277	0,243	0,292	0,376	0,389	0,301	0,293
1000	0,225	0,288	0,326	0,216	0,189	0,228	0,316	0,326	0,234	0,231
1250	0,166	0,229	0,267	0,167	0,142	0,169	0,256	0,268	0,180	0,178
1600	0,098	0,169	0,217	0,127	0,097	0,103	0,200	0,215	0,135	0,126
2000	0,011	0,095	0,163	0,084	0,027	0,028	0,135	0,161	0,084	0,047
2500	-0,162	-0,003	0,084	0,046	-0,062	-0,108	0,061	0,096	0,027	0,008
3150	-0,210	-0,127	-0,076	-0,024	-0,150	-0,134	-0,050	-0,011	-0,069	-0,156
4000	-0,128	-0,191	-0,171	-0,100	-0,227	-0,094	-0,086	-0,041	-0,153	-0,266
5000	-0,400	0,047	-0,017	-0,026	0,010	-0,187	-0,015	0,014	-0,023	-0,065

Tabla 4.4-5 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo industrial 01 d=0.5 [cm]

Coeficiente de absorción - Ladrillo industrial 01										
d=1cm										
f [HZ]	A01	A02	A03	A04	A05	B01	B02	B03	B04	B05
100	0,631	0,427	0,511	0,394	0,407	0,000	0,353	0,000	0,364	0,352
125	0,258	0,144	0,125	0,105	0,116	0,000	0,113	0,000	0,103	0,098
160	0,188	0,079	0,067	0,062	0,046	0,162	0,061	0,156	0,065	0,053
200	0,210	0,111	0,099	0,110	0,083	0,136	0,094	0,137	0,096	0,085
250	0,214	0,119	0,114	0,130	0,099	0,155	0,103	0,159	0,114	0,102
315	0,328	0,263	0,263	0,284	0,246	0,264	0,248	0,283	0,267	0,247
400	0,459	0,434	0,435	0,432	0,391	0,415	0,430	0,471	0,419	0,401
500	0,518	0,518	0,524	0,500	0,457	0,475	0,523	0,553	0,490	0,471
630	0,514	0,536	0,540	0,497	0,462	0,474	0,556	0,572	0,497	0,485
800	0,448	0,481	0,484	0,427	0,396	0,411	0,509	0,522	0,432	0,424
1000	0,367	0,399	0,404	0,343	0,315	0,322	0,430	0,440	0,347	0,342
1250	0,290	0,315	0,325	0,272	0,243	0,236	0,348	0,359	0,272	0,265
1600	0,200	0,223	0,254	0,212	0,173	0,144	0,268	0,285	0,206	0,192
2000	0,041	0,079	0,172	0,136	0,064	-0,010	0,168	0,200	0,120	0,084
2500	-0,216	-0,018	0,060	0,067	-0,078	-0,228	0,074	0,093	0,028	-0,073
3150	-0,277	-0,256	-0,123	-0,070	-0,265	-0,251	-0,102	-0,100	-0,124	-0,339
4000	-0,147	-0,349	-0,267	-0,179	-0,395	-0,152	-0,155	-0,146	-0,216	-0,550
5000	-0,403	0,138	0,057	-0,059	-0,030	-0,198	0,053	0,083	-0,034	-0,114

Tabla 4.4-6 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo industrial 01 d=1 [cm]

- Ladrillo industrial 01 – Rodeado de placas reflectantes

Finalmente se realizó una medición referencial de 3 puntos a 1cm para confirmar la influencia del material que rodea a la estructura.



Figura 4.4-6 Ladrillo Industrial 01 - Placas reflectantes - Sonda de impedancia

Coefficiente de absorción - Ladrillo Industrial 01 - paneles reflectantes			
f [HZ]	P1	P2	P3
	1 [cm]	1 [cm]	1 [cm]
100	0,336	0,391	0,423
125	0,210	0,266	0,227
160	0,177	0,230	0,173
200	0,113	0,150	0,106
250	0,091	0,122	0,081
315	0,108	0,151	0,106
400	0,114	0,159	0,113
500	0,117	0,143	0,110
630	0,157	0,172	0,147
800	0,171	0,206	0,163
1000	0,173	0,192	0,153
1250	0,230	0,238	0,203
1600	0,249	0,242	0,226
2000	0,225	0,266	0,263
2500	0,050	0,265	0,126
3150	-0,327	0,123	-0,096
4000	-0,607	-0,203	-1,274
5000	-0,550	0,178	-0,355

Tabla 4.4-7 Resultados sonda de impedancia - Ladrillo industrial 01 d=1 [cm]
con placas reflectantes

4.4.1.2. Influencia de la distancia de medición

A medida que la sonda se aleja de la muestra, la influencia del material que la rodea se hace más evidente como se observa para los ladrillos artesanales 01, 02 y en el ladrillo industrial 01, donde la absorción a 1cm es más alta, para el ladrillo 04 que es el más pequeño, se hace más evidente la influencia del recinto ya que la absorción a 1 cm es más baja que a 5 cm.

- Ladrillo artesanal 01

Coefficiente de absorción - Ladrillo artesanal 01		
f [HZ]	0,5 [cm]	1 [cm]
100	0,32	0,24
125	0,14	0,10
160	0,11	0,09
200	0,09	0,08
250	0,11	0,12
315	0,21	0,25
400	0,31	0,40
500	0,36	0,46
630	0,36	0,48
800	0,33	0,44
1000	0,29	0,38
1250	0,25	0,32
1600	0,19	0,24
2000	0,09	0,10
2500	0,01	-0,06
3150	-0,09	-0,26
4000	-0,18	-0,38
5000	-0,29	-0,53

Tabla 4.4-8 Ladrillo artesanal 01 - Comparación distancias

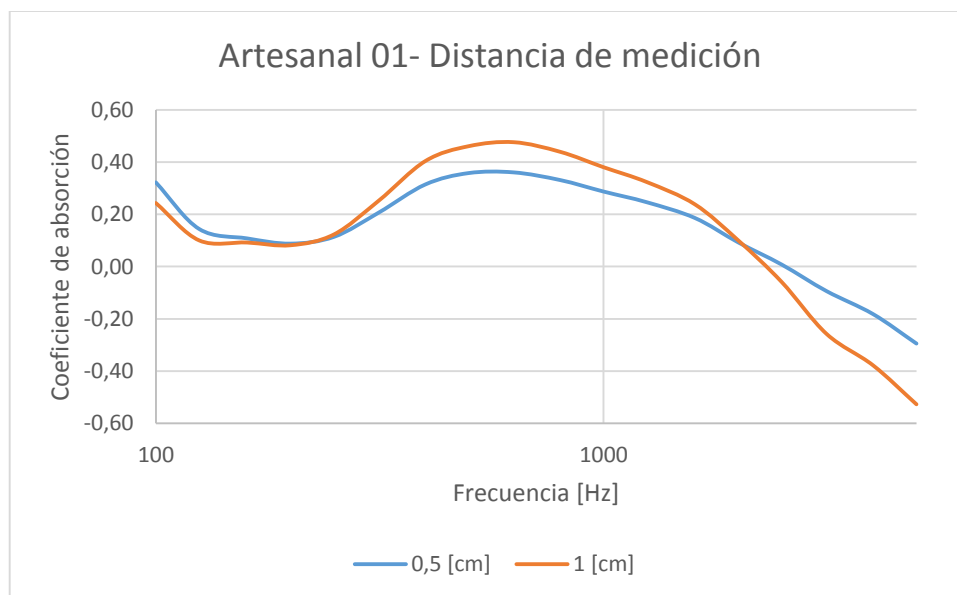


Figura 4.4-7 Ladrillo artesanal 01 - Comparación distancias

- Ladrillo artesanal 02

Coeficiente de absorción - Ladrillo artesanal 02		
f [HZ]	0,5 [cm]	1 [cm]
100	0,62	0,42
125	0,21	0,16
160	0,14	0,13
200	0,09	0,11
250	0,09	0,12
315	0,17	0,26
400	0,24	0,37
500	0,26	0,42
630	0,25	0,41
800	0,22	0,36
1000	0,18	0,29
1250	0,14	0,22
1600	0,11	0,16
2000	0,06	0,06
2500	0,02	-0,04
3150	0,03	-0,05
4000	0,06	0,03
5000	0,06	0,01

Tabla 4.4-9 Ladrillo artesanal 02 - Comparación distancias

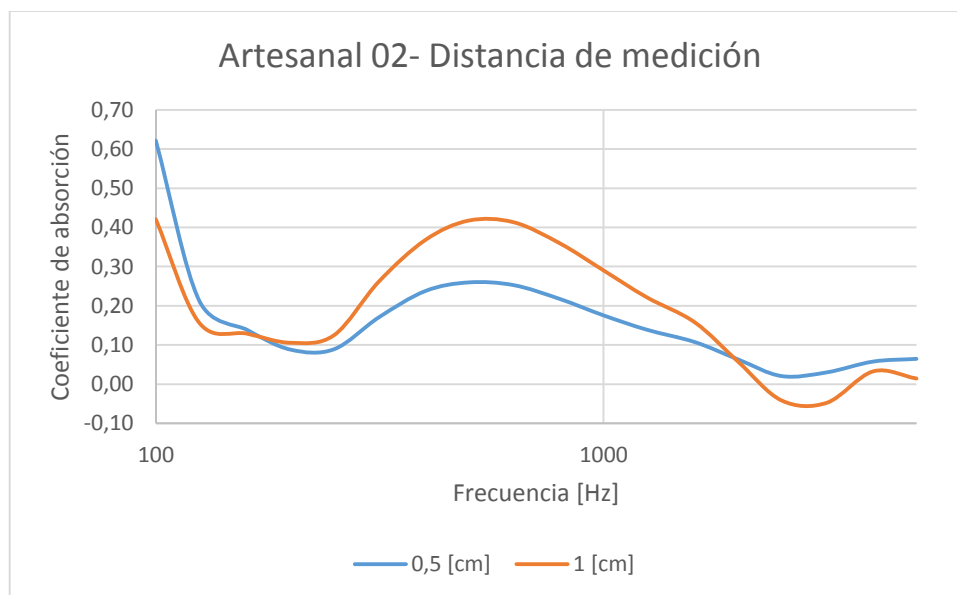


Figura 4.4-8 Ladrillo artesanal 02 - Comparación distancias

- Ladrillo artesanal 04

Coefficiente de absorción - Ladrillo artesanal 04		
f [HZ]	0,5 [cm]	1 [cm]
100	0,11	0,05
125	0,02	-0,06
160	0,04	-0,02
200	0,06	0,01
250	0,09	0,07
315	0,30	0,32
400	0,48	0,53
500	0,57	0,64
630	0,62	0,70
800	0,60	0,69
1000	0,56	0,64
1250	0,53	0,61
1600	0,53	0,61
2000	0,52	0,60
2500	0,45	0,52
3150	0,35	0,38
4000	0,22	0,19
5000	-0,04	-0,34

Tabla 4.4-10 Ladrillo artesanal 04 - Comparación distancias

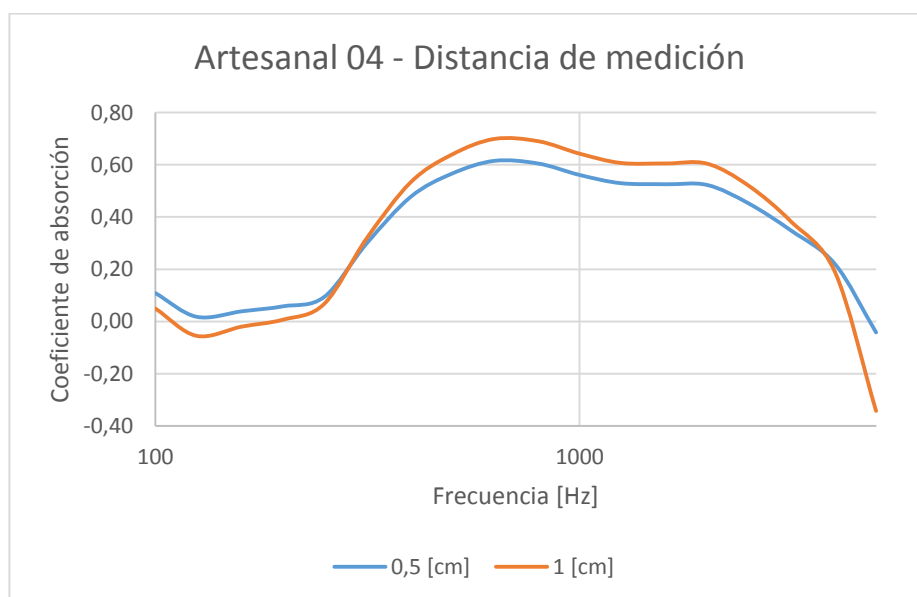


Figura 4.4-9 Ladrillo artesanal 04 - Comparación distancias

- Ladrillo industrial 01 – Rodeado de lana de vidrio

Coefficiente de absorción - Ladrillo industrial 01		
f [HZ]	0,5 [cm]	1 [cm]
100	0,57	0,34
125	0,18	0,11
160	0,10	0,09
200	0,10	0,12
250	0,10	0,13
315	0,21	0,27
400	0,32	0,43
500	0,37	0,50
630	0,37	0,51
800	0,32	0,45
1000	0,26	0,37
1250	0,20	0,29
1600	0,15	0,22
2000	0,08	0,11
2500	0,00	-0,03
3150	-0,10	-0,19
4000	-0,15	-0,26
5000	-0,07	-0,05

Tabla 4.4-11 Ladrillo industrial 01 - Comparación distancias

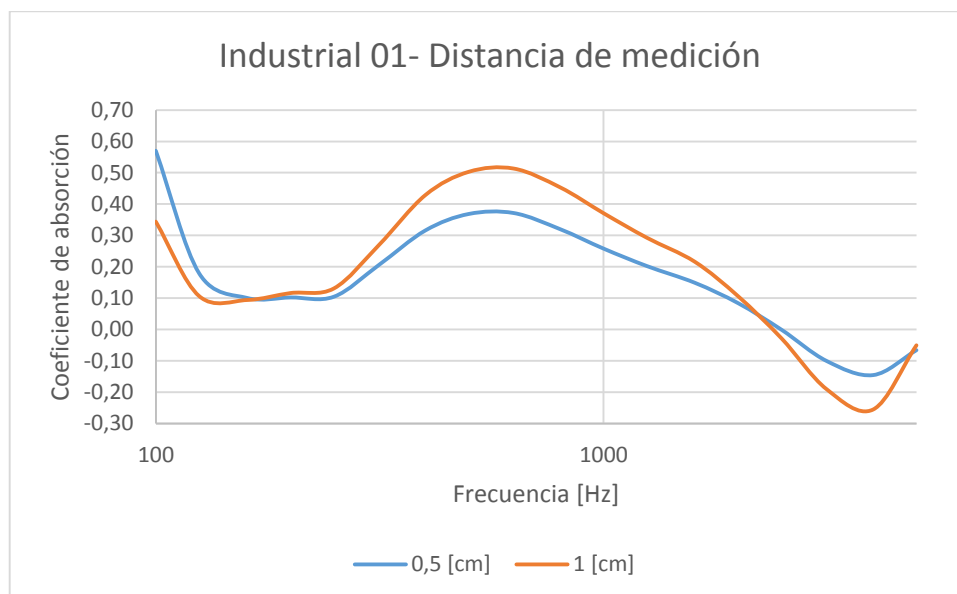


Figura 4.4-10 Ladrillo industrial 01 - Comparación distancias

4.4.1.3. Influencia del tamaño de la muestra

Otro punto importante a considerar es el tamaño de la muestra, ya que si bien el sistema está concebido para realizar ensayos en muestras de mínimo 1m^2 , se quiso comprobar los límites de la capacidad de la sonda de impedancia para comprobar su efectividad con muestras de diferentes tamaños.

Influencia del tamaño de la muestra en el coeficiente de absorción medido			
f [HZ]	Artesanal 01	Artesanal 02	Artesanal 04
100	0,287	0,521	0,079
125	0,125	0,185	-0,019
160	0,100	0,134	0,010
200	0,085	0,097	0,033
250	0,119	0,107	0,081
315	0,230	0,216	0,309
400	0,359	0,303	0,506
500	0,410	0,339	0,603
630	0,419	0,333	0,657
800	0,386	0,288	0,647
1000	0,334	0,233	0,602
1250	0,285	0,180	0,568
1600	0,212	0,132	0,565
2000	0,096	0,060	0,563
2500	-0,026	-0,011	0,487
3150	-0,176	-0,009	0,366
4000	-0,280	0,045	0,205
5000	-0,411	0,039	-0,192

Tabla 4.4-12 Coeficiente de absorción según tamaño de la muestra

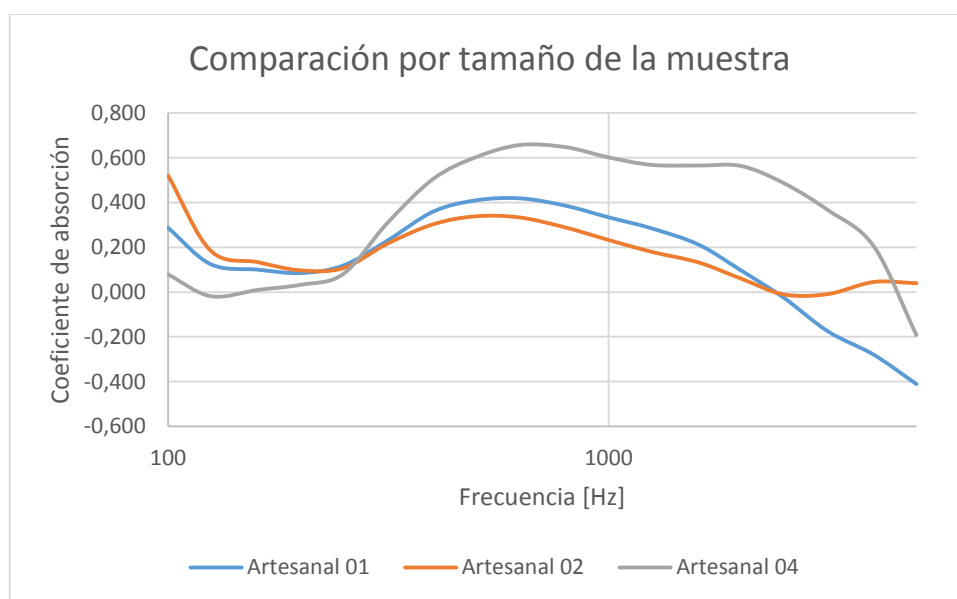


Figura 4.4-11 Coeficiente de absorción según tamaño de la muestra

Como se puede observar, la muestra de ladrillo artesanal 04 que es la de menor tamaño es la más influenciada por el material que le rodea presentando un coeficiente de absorción bastante mayor, seguida por la muestra de ladrillo artesanal 01 que en orden de tamaño es la mediana.

4.4.1.4. Influencia del material que rodea a la muestra

Para este caso se evaluó el ladrillo industrial, y se encontró que la influencia del material que rodea a la muestra es muy grande a tal punto que trastoca completamente la calidad de los datos obtenidos.

Influencia del material que rodea a la muestra en el Coeficiente de absorción medido		
f [HZ]	Lana de vidrio	Paneles reflectantes
100	0,457	0,383
125	0,142	0,234
160	0,097	0,193
200	0,109	0,123
250	0,118	0,098
315	0,238	0,122
400	0,372	0,129
500	0,436	0,123
630	0,442	0,159
800	0,387	0,180
1000	0,314	0,173
1250	0,247	0,224
1600	0,182	0,239
2000	0,094	0,251
2500	-0,015	0,147
3150	-0,146	-0,100
4000	-0,201	-0,695
5000	-0,058	-0,242

Tabla 4.4-13 Coeficiente de absorción según el material que rodea a la muestra

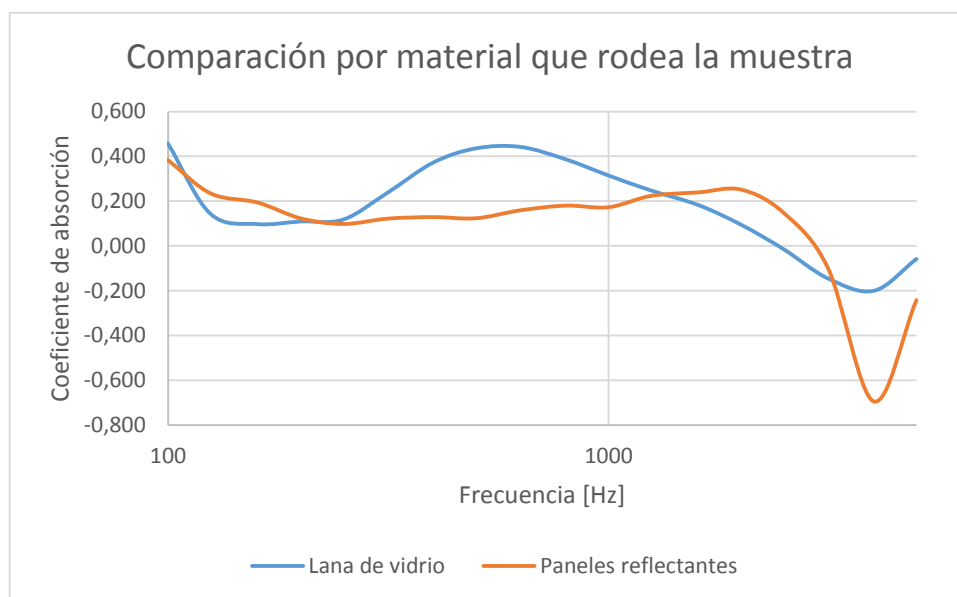


Figura 4.4-12 Coeficiente de absorción según el material que rodea a la muestra

4.4.2. Método de tubo de impedancia

Una vez realizadas todas las mediciones previas, se procede a cortar las muestras de acuerdo a los requerimientos del tubo de impedancia, durante este proceso se encontraron algunos problemas relacionados con la consistencia de los ladrillos.

Para cortar los ladrillos se utilizó brocas especiales capaces de sacar pedazos de forma circular, de tamaños cercanos a los necesarios, pero se debía considerar el hecho de la fragilidad del ladrillo artesanal y la dureza del ladrillo industrial.

El ladrillo artesanal al momento de ser cortado perdía mucha materia, además tenía una tendencia a romperse sobre todo cuando se trataba del corte para el tubo de 29mm, las muestras tenían un grosor mayor al tamaño de la herramienta de corte, por lo que se tuvo que cortar por los 2 lados, lo que llevo a cierta irregularidad en su forma.



Figura 4.4-13 Ladrillo Artesanal – piezas grandes

Las piezas pequeñas tuvieron que ser lijadas para que entren dentro del tubo pequeño, este proceso ocasiono que algunas se rompieran por la mitad e irregularidades en su forma.



Figura 4.4-14 Ladrillo artesanal - piezas pequeñas

En cuanto al ladrillo industrial, las diferencias de consistencia se hicieron más evidentes en el momento de corte, ya el corte del número 01 se dificulto debido a su dureza, tendiendo a romperse y presentando una beta de material bastante fuerte en la parte central.



Figura 4.4-15 Anomalías Ladrillo industrial 01

Finalmente se pudo cortar una pieza grande de la cual solo un lado era apto para las mediciones, y una pieza pequeña, que también debía pasar por el proceso de lijado, mismo que no fue posible debido a lo duro del material, además esta desprendía chispas cuando se lo intentaba debido a las betas de metal en su interior.



Figura 4.4-16 Ladrillo industrial 01 - pieza grande

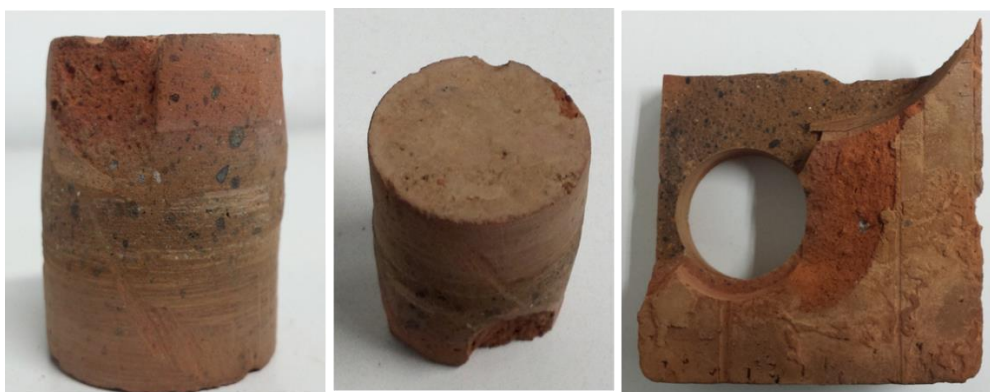


Figura 4.4-17 Ladrillo industrial 01 - Pieza pequeña



Figura 4.4-18 Ladrillo industrial - Comparativa diámetro piezas pequeñas

El ladrillo industrial 02 no presentó tantos inconvenientes al momento de cortar, las piezas que se obtuvieron quedaron con una forma bastante regular y con tamaños bastante aceptables.

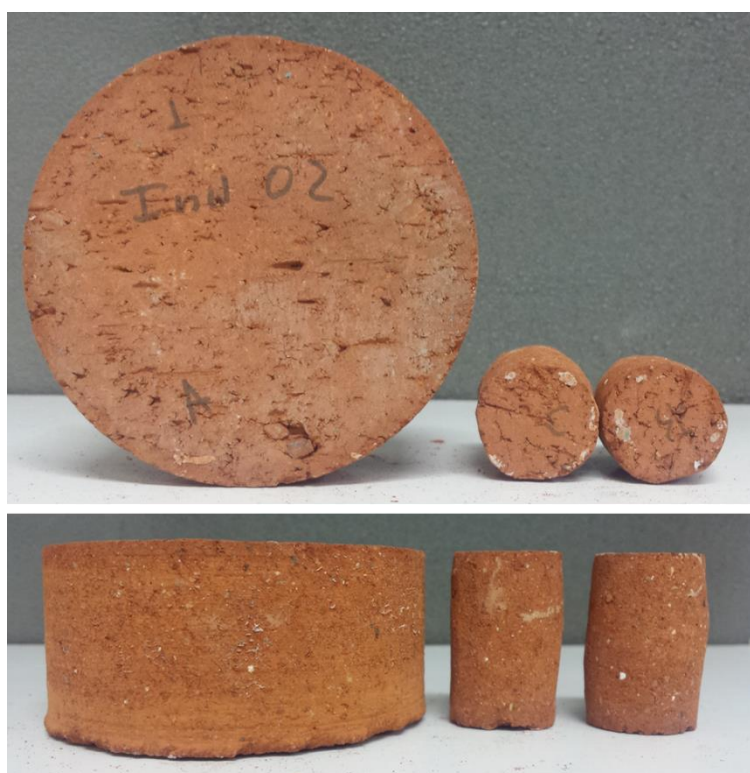


Figura 4.4-19 Ladrillo industrial 02 – Piezas

Se realizaron 36 mediciones para cada ladrillo, 18 para alta frecuencia, con tubo pequeño y 18 para baja frecuencia con el tubo grande, variando lados de las piezas, y la configuración de la plastilina con la que se sellaron los bordes, ambos sets se combinaron y promediaron mediante el uso del software del sistema pulse, a continuación se presentan los resultados, por bandas de tercio de octava en un rango entre 100 Hz y 5000 Hz.

4.4.2.1. Resultados Ladrillo artesanal

Las diferencias en cuanto a la calidad de los ladrillos se hace bastante evidente al comparar sus absorciones, presentando una tendencia similar en todos los casos, si bien la absorción en general es bastante baja, tal como se esperaba, hay un incremento en el área de la alta frecuencia debido a la estructura porosa del material.

Coefficiente de absorción – Ladrillo artesanal				
f [HZ]	Artesanal 01	Artesanal 02	Artesanal 04	Promedio
100	0,048	0,064	0,063	0,058
125	0,033	0,053	0,048	0,045
160	0,048	0,069	0,060	0,059
200	0,045	0,063	0,057	0,055
250	0,047	0,065	0,051	0,054
315	0,049	0,068	0,050	0,056
400	0,051	0,072	0,052	0,058
500	0,056	0,071	0,057	0,061
630	0,063	0,063	0,046	0,057
800	0,066	0,068	0,049	0,061
1000	0,075	0,074	0,056	0,068
1250	0,081	0,082	0,065	0,076
1600	0,086	0,078	0,071	0,078
2000	0,082	0,070	0,067	0,073
2500	0,086	0,072	0,069	0,076
3150	0,094	0,080	0,078	0,084
4000	0,108	0,095	0,090	0,098
5000	0,131	0,103	0,115	0,116

Tabla 4.4-14 Resultados coeficiente de absorción - Ladrillo Artesanal

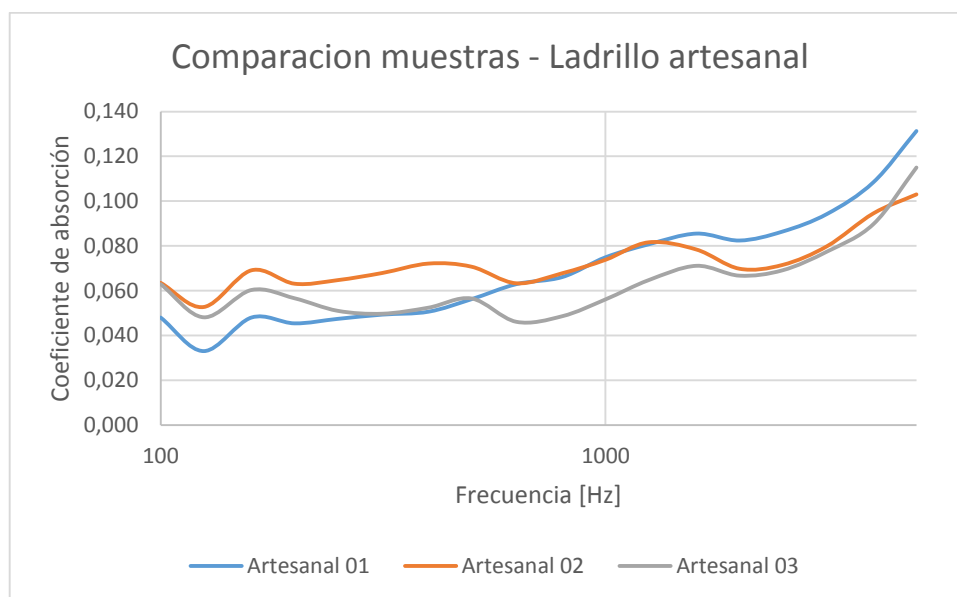


Figura 4.4-20 Comparación coeficiente de absorción - Ladrillo artesanal

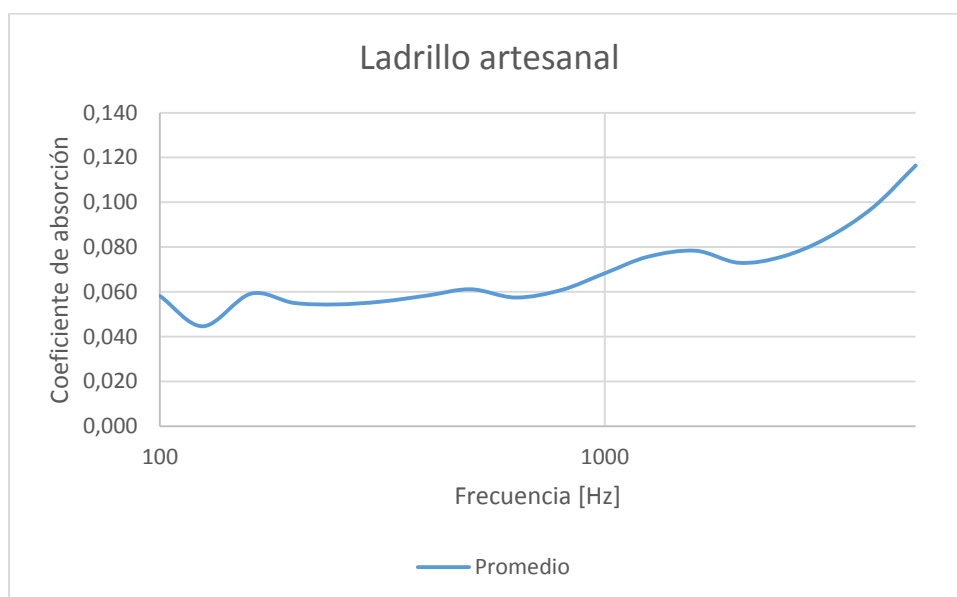


Figura 4.4-21 Coeficiente de absorción promedio - Ladrillo artesanal

4.4.2.1. Resultados Ladrillo Industrial

Debido a los inconvenientes técnicos generados por la calidad del ladrillo industrial 01 no fue posible realizar la medición para alta frecuencia, a pesar de esto se puede observar que la tendencia en cuanto a su absorción es bastante similar a la del ladrillo industrial 02.

La absorción al igual que en el caso anterior es bastante baja tal cual se lo esperaba, presentando además un énfasis en la banda de los 500 HZ para el ladrillo artesanal 02, lo que probablemente esté relacionado con su estructura que de alguna manera le facilita absorber mejor esta frecuencia.

Coefficiente de absorción – Ladrillo industrial		
f [HZ]	Industrial 01	Industrial 02
100	0,021	0,020
125	0,008	0,014
160	0,025	0,022
200	0,020	0,021
250	0,022	0,023
315	0,023	0,024
400	0,024	0,024
500	0,028	0,025
630	0,029	0,028
800	0,028	0,034
1000	0,030	0,034
1250	0,029	0,037
1600	0,037	0,043
2000		0,042
2500		0,040
3150		0,048
4000		0,060
5000		0,065

Tabla 4.4-15 Resultados coeficiente de absorción - Ladrillo industrial

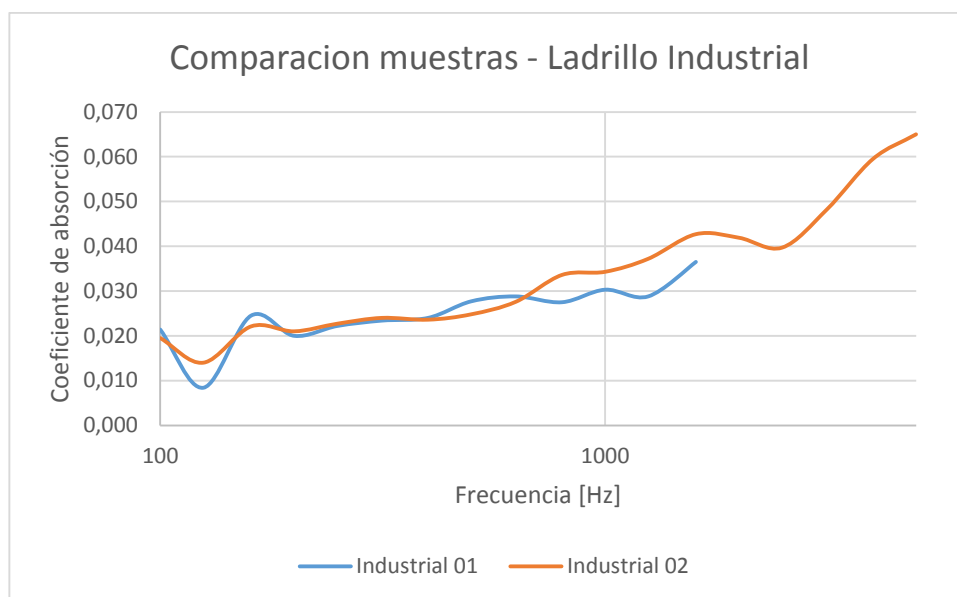


Figura 4.4-22 Comparación coeficiente de absorción - Ladrillo industrial

4.5. Calculo teórico del aislamiento

Para el cálculo teórico del índice de reducción acústica se debe tomar en cuenta los parámetros que se necesitan según la zona de la ley de la maza donde nos estemos moviendo.

Otro factor importante a considerar es el hecho de que los ladrillos van en particiones hechas con morteros, para poder realizar una comparación adecuada se ha hecho el cálculo con valores de densidad del mortero que propone el catalogo técnico de la edificación español, mortero 1 con una densidad de 1900 [kg/m³] y el de uso común en Ecuador, mortero 2 con una densidad de 2100 [kg/m³], considerando que la proporción de mortero en la pared será del 10%.

- Zona 1 – Controlada por la rigidez

Para este caso, se requiere el valor de la rigidez de las muestras, mismo que se desconoce, pero se espera que la frecuencia natural tenga un valor muy por debajo del rango de interés.

- Zona 2 – controlada por las resonancias

Aquí se tiene la presencia de los modos propios del material, siendo el más notorio el modo 1,1 mismo que suele marcar la transición entre la zona controlada por las resonancias y la zona controlada por la masa.

Para el cálculo del modo 1,1 se aplicara la ecuación 3.5-6, se considerará el tipo de aparejo utilizado, si este está a pie o 1/2 pie.

También se toma en cuenta para cálculo, la velocidad del sonido de 340 [m/s] y la velocidad de la onda longitudinal de 2700 [m/s]⁵¹.

		f₁₁ [Hz]
Artesanal	Pie	77
	1/2 Pie	47
Industrial	Pie	63
	1/2 Pie	26

Como se puede observar en la tabla los valores del modo 1,1 son están fuera del rango de interés que va normalmente desde los 100 Hz, lo que confirma que la frecuencia natural estará tendrá un valor aún más bajo, y obviamente también estará fuera del rango de interés.

- Zona 3 – Controlada por la masa

Conociendo el límite inferior se puede calcular coeficiente de reducción acústica para cada muestra, utilizando las ecuaciones:

- 3.5-8 para incidencia normal
- 3.5-10 para incidencia aleatoria
- 3.5-11 para incidencia de campo

El cálculo se realizara hasta la banda de frecuencia anterior a la banda donde se encuentra la frecuencia crítica.

- Zona 4 - Controlada por la coincidencia

Una vez determinado el límite inferior de la zona controlada por la masa, se procede a determinar al límite superior es decir la frecuencia crítica, para saber si está dentro del rango de interés que va normalmente hasta los 5000Hz.

⁵¹ C. Hopkins "Sound Insulation" pp 608

Utilizando la fórmula 3.5-12 se procede a calcular los valores de la frecuencia para cada tipo de ladrillo, tanto para el aparejo de pie o 1/2 pie, tomando en cuenta al igual que en el caso anterior, los valores de la velocidad del sonido y la velocidad de onda longitudinal.

		f_c [Hz]	$f_c \cdot h^{52}$
Artesanal	Pie	189	24
	1/2 Pie	311	24
Industrial	Pie	231	24
	1/2 Pie	566	24

Tabla 4.5-1 Frecuencia critica

Se realiza el cálculo del producto de la frecuencia por el grosor del aparejo, para confirmar que esta esté dentro de los rangos esperados, según el Hopkins en su libro “Sound Insulation”, este valor debe ser aproximadamente 24, tal como se observa en la tabla.

Las frecuencias críticas están dentro del rango de interés, por lo tanto se calculara el coeficiente de reducción sonora considerando el efecto de coincidencia tanto para la banda de tercio de octava donde se encuentra la frecuencia critica con la ecuación 3.5-14 como para las bandas de interés por sobre esta con la expresión 3.5-17, siendo el valor del factor de perdidas (η) 0.01⁵³.

4.5.1. Resultados Cálculo del aislamiento

4.5.1.1. Ladrillo Artesanal

Los valores del coeficiente de reducción acústica obtenidos para el ladrillo artesanal solo no presentan grandes variaciones si se considera solo ladrillo, o una pared con mortero 1 o 2, la variación en la densidad y la masa superficial no es lo suficientemente grande como para generar un aumento importante en el aislamiento, en el mejor de los casos es de medio decibel, donde si hubo cambios es al considerar el tipo de aparejo, ya que la frecuencia critica cambia influenciando la forma como cae en la banda donde se encuentra y cómo será la subida para la zona por sobre esta.

⁵² C. Hopkins “Sound Insulation” pp 608

⁵³ C. Hopkins “Sound Insulation” pp 608

Por otra parte, el cálculo se ha realizado considerando incidencia normal, pero para efectos gráficos, se ha tomado como que la curva continua igual tanto para la incidencia aleatoria y de campo.

Ladrillo artesanal – 1 pie – Frecuencia critica 189 [Hz]			
Frecuencia	Normal	Aleatoria	Campo
100	41,6	31,8	36,6
125	43,5	33,5	38,5
160	45,7	35,4	40,7
200	19,9	19,9	19,9
250	28,1		
315	31,2		
400	34,3		
500	37,2		
630	40,2		
800	43,3		
1000	46,2		
1250	49,1		
1600	52,3		
2000	55,2		
2500	58,1		
3150	61,2		
4000	64,3		
5000	67,2		

Tabla 4.5-2 Resultados: Ladrillo artesanal – 1 pie – Frecuencia critica 189 [Hz]

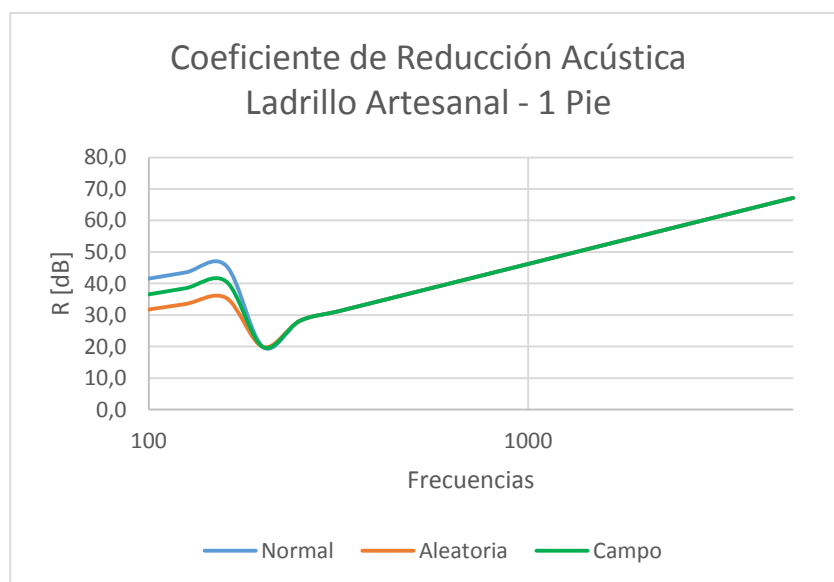


Figura 4.5-1 Resultados: Ladrillo artesanal – 1 pie – Frecuencia critica 189 [Hz]

Ladrillo artesanal – 1/2 pie – Frecuencia critica 311 [Hz]			
Frecuencia	Normal	Aleatoria	Campo
100	41,6	31,8	36,6
125	43,5	33,5	38,5
160	45,7	35,4	40,7
200	47,6	37,2	42,6
250	49,5	39,0	44,5
315	23,6	23,6	23,6
400	32,1		
500	35,0		
630	38,0		
800	41,1		
1000	44,0		
1250	47,0		
1600	50,2		
2000	53,1		
2500	56,0		
3150	59,0		
4000	62,1		
5000	65,0		

Tabla 4.5-3 Resultados: Ladrillo artesanal – 1/2 pie – Frecuencia critica 311 [Hz]

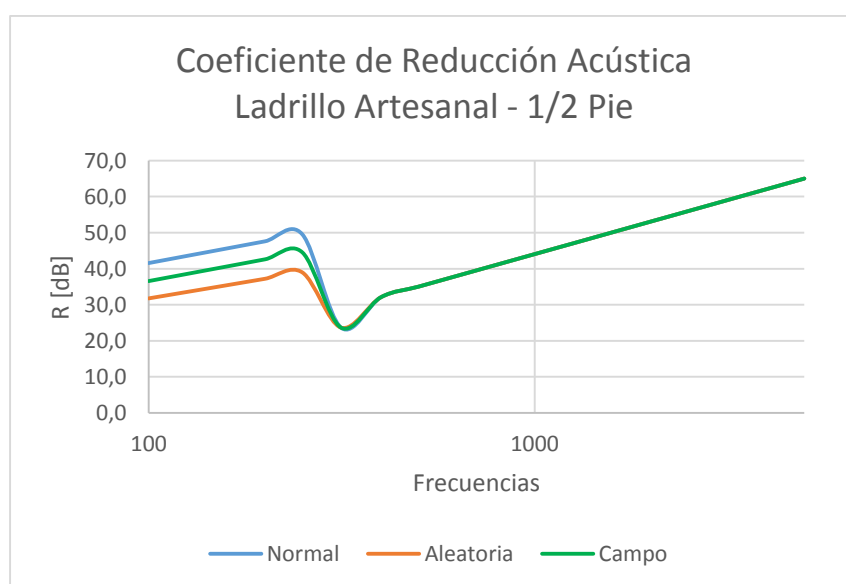


Figura 4.5-2 Resultados: Ladrillo artesanal – 1/2 pie – Frecuencia critica 311 [Hz]

4.5.1.1. Ladrillo Industrial

Al igual que en el caso anterior, los valores del coeficiente de reducción acústica, no varían en más de medio decibel, considerando la forma como está hecha la partición, también se nota la diferencia entre el aparejo a 1 pie y a ½ pie.

Ladrillo Industrial – 1 pie – Frecuencia crítica 231 [Hz]			
Frecuencia	Normal	Aleatoria	Campo
100	42,6	32,7	37,6
125	44,5	34,4	39,5
160	46,7	36,4	41,7
200	48,6	48,6	48,6
250	23,0	23,0	23,0
315	26,6		
400	31,7		
500	35,7		
630	39,4		
800	43,0		
1000	46,2		
1250	49,4		
1600	52,8		
2000	55,9		
2500	58,9		
3150	62,0		
4000	65,2		
5000	68,1		

Tabla 4.5-4 Resultados: Ladrillo industrial – 1 pie – Frecuencia crítica 231 [Hz]

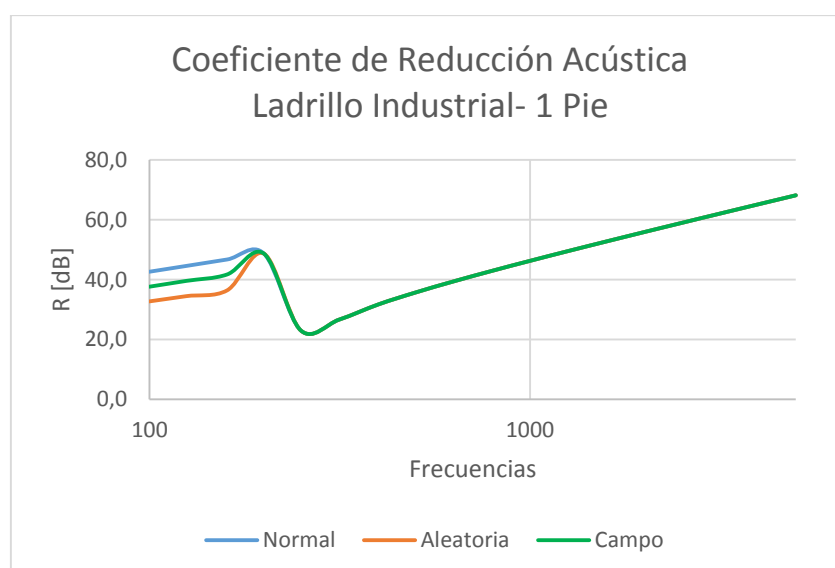


Figura 4.5-3 Resultados: Ladrillo industrial – 1 pie – Frecuencia crítica 231 [Hz]

Ladrillo Industrial – 1 pie – Frecuencia crítica 566 [Hz]			
Frecuencia	Normal	Aleatoria	Campo
100	42,6	32,7	37,6
125	44,5	34,4	39,5
160	46,7	36,4	41,7
200	48,6	38,1	43,6
250	50,6	39,9	45,6
315	52,6	41,7	47,6
400	54,6	43,7	49,6
500	56,6	45,4	51,6
630	31,1	31,1	31,1
800		35,2	
1000		39,8	
1250		43,8	
1600		47,7	
2000		51,1	
2500		54,3	
3150		57,6	
4000		60,9	
5000		63,9	

Tabla 4.5-5 Resultados: Ladrillo industrial – 1/2 pie – Frecuencia crítica 566 [Hz]

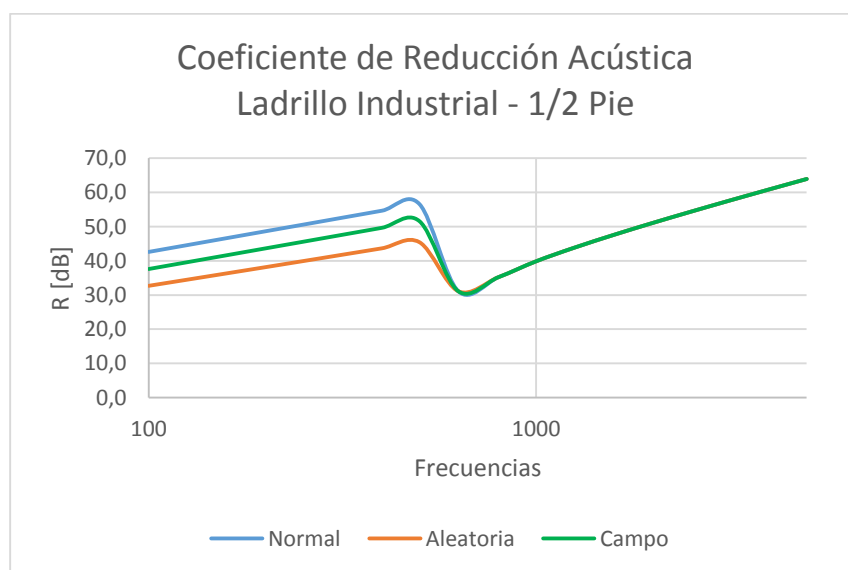


Figura 4.5-4 Resultados: Ladrillo industrial – 1/2 pie – Frecuencia crítica 566 [Hz]

4.5.1.1. Índice de reducción sonora global R_A

Para este cálculo ha tomado en cuenta la expresión 3.5-19 ya que las masas por unidad de superficie las muestras son superiores a 150 [kg/m²], no se ha tomado en

cuenta si el aparejo es a 1 pie o a $\frac{1}{2}$ pie ya que para este caso la densidad por unidad de superficie no cambia.

		R_A [dBA]
Artesanal	Solo	38,75
	Mortero 1	39,44
	Mortero 2	39,63
Industrial	Solo	40,64
	Mortero 1	40,64
	Mortero 2	40,82

Tabla 4.5-6 Resultados: Índice de reducción sonora global R_A

Los resultados comprueban la tendencia que ya se veía desde los cálculos del índice de reducción sonora por frecuencias, no existe mayor variación respecto a si la partición está constituida solo por ladrillo o si está construida con mortero.

Se debe notar que el mortero está siendo usado únicamente como material para juntar los ladrillos, es decir que se considera únicamente una pared de ladrillo sin ningún tipo de acabado.

4.6. Calculo de incertidumbre

Para el cálculo de incertidumbre se ha tomado en cuenta los métodos planteados en la “Guía para la expresión de incertidumbre de medida”- GUM, aplicándolos para cada caso.

4.6.1. Incertidumbre dimensiones

Para el caso de las dimensiones se ha trabajado independientemente para cada muestra ya que cada una tiene dimensiones distintas.

- Tipo A

Se ha considerado para la incertidumbre de tipo A la desviación típica de la media de los resultados, para esto se ha aplicado la expresión 3.6-3.

- Tipo B

Aquí se ha tomado en cuenta la resolución de la escala de la regla con la que se midió siendo esta de medio milímetro (0.0005 [m]), y se ha usado la trabajado con la expresión 3.6-5 considerando que su distribución probabilística es rectangular.

- Incertidumbre combinada y expandida

Una vez obtenidos los valores de la incertidumbre A y B, se usa la expresión de la propagación de incertidumbres 3.6-7.

			Incertidumbre - Dimensiones					
			Largo		Ancho		Alto	
			u_i	U	u_i	U	u_i	U
Artesanal	1	M01	0,0007	0,0013	0,0003	0,0007	0,0004	0,0007
		M02	0,0006	0,0012	0,0005	0,0009	0,0004	0,0008
	2		0,0019	0,0037	0,0004	0,0008	0,0006	0,0012
	3		0,0006	0,0011	0,0004	0,0007	0,0005	0,0009
Industrial	1		0,0003	0,0007	0,0003	0,0006	0,0003	0,0006
	2		0,0009	0,0018	0,0004	0,0007	0,0003	0,0006

Tabla 4.6-1 Incertidumbre dimensiones

4.6.2. Incertidumbre peso

Al momento de realizar el pesaje de las muestras, se observó que los valores no cambiaban, aun así se realizaron 3 medidas, por lo que la incertidumbre tipo A va a ser cero ya que no hay desviación en los valores obtenidos. Por otro lado la única incertidumbre que nos queda es la de tipo B correspondiente a la resolución del equipo de medida, para la cual se utilizó al igual que en el caso anterior la expresión 3.6-5.

Incertidumbre Peso		
Artesanal 01	M01	2,89E-03
	M02	2,89E-03
Artesanal 02		2,89E-03
Artesanal 03		2,89E-03
Industrial 01		2,89E-03
Industrial 02		2,89E-03

Tabla 4.6-2 Incertidumbre Peso

4.6.3. Incertidumbre Volumen

Para el cálculo del volumen de cada muestra se ha utilizado la expresión 3.2-2, considerando sus dimensiones largo (l), ancho (a) y altura (h).

Para la incertidumbre de medida del volumen de cada muestra se ha considerado las incertidumbres típicas de cada dimensión utilizada para el cálculo del volumen con su respectivo coeficiente de sensibilidad, calculados en base a la expresión

3.6-8, ya que no están correlacionadas, quedando los coeficientes de sensibilidad siguiente manera:

$$\frac{\partial v}{\partial l} = a * h \quad (4.6-1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial a} = l * h \quad (4.6-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial h} = l * a \quad (4.6-3)$$

Utilizado la expresión 3.6-5 se ha calculado la incertidumbre para el volumen:

		Incertidumbre Volumen	
		u	U
Artesanal 01	M01	8,92E-06	1,78E-05
	M02	8,03E-06	1,61E-05
Artesanal 02		2,23E-05	4,47E-05
Artesanal 03		1,35E-05	2,71E-05
Industrial 01		1,71E-06	3,42E-06
Industrial 02		4,82E-06	9,64E-06

Tabla 4.6-3 Incertidumbre Volumen

4.6.4. Incertidumbre densidad

Se ha calculado la incertidumbre típica de la densidad para cada muestra de cada tipo, considerando los valores de incertidumbre típica del peso y del volumen, con sus respectivos coeficientes de sensibilidad que son las derivadas parciales de la ecuación de la densidad 3.2-3.

$$\frac{\partial p}{\partial v} = \frac{1}{v} \quad (4.6-4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial p} = \frac{-p}{v^2} \quad (4.6-5)$$

		$u(\rho_i)$
Artesanal 01	M01	9,11
	M02	7,99
Artesanal 02		15,03
Artesanal 03		6,96
Industrial 01		4,64
Industrial 02		10,34

Tabla 4.6-4 Incertidumbre típica para la densidad de cada muestra

Luego se considera que la densidad por tipo de muestra fue calculada como el promedio de los valores de densidad de cada muestra con la ecuación 3.2-1, y en función de esto se debe considerar también los coeficientes de sensibilidad para esta:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_n} = \frac{1}{n} \quad (4.6-6)$$

	Incertidumbre de la Densidad	
	u_i	U
Artesanal	10	21
Industrial	8	16

Tabla 4.6-5 Incertidumbre de la Densidad

4.6.5. Incertidumbre Masa por unidad de superficie

También para este caso se han calculado los valores de incertidumbre típica de la masa por unidad de superficie para cada muestra, considerando la forma como fue calculada, para la obtención de los coeficientes de sensibilidad:

$$m_s = \frac{\rho}{\sqrt[3]{v}} \quad (4.6-7)$$

$$\frac{\partial m_s}{\partial \rho} = \frac{1}{\sqrt[3]{v}} \quad (4.6-8)$$

$$\frac{\partial m_s}{\partial v} = \frac{-\rho}{3\sqrt[3]{v^4}} \quad (4.6-9)$$

		u(m _{si})
Artesanal 01	M01	89
	M02	76
Artesanal 02		125
Artesanal 03		54
Industrial 01		52
Industrial 02		112

Tabla 4.6-6 Incertidumbre típica para la masa por unidad de superficie de cada muestra

	Incertidumbre de la masa por unida de superficie	
	ui	U
Artesanal	90	179
Industrial	87	174

Tabla 4.6-7 Incertidumbre de la masa por unida de superficie

4.6.6. Coeficiente de absorción

Para el cálculo directo de la incertidumbre se debe considerar que el modelo de procesamiento de señales realizado por el sistema pulse es complejo, por lo que se debe utilizar aproximaciones, la primera alternativa es consultar si existe algún estudio sobre la incertidumbre del método, para este caso se encontró el trabajo de fin de master “Estudio de la Precisión en la Determinación del Coeficiente de Absorción Acústica en Tubo de Impedancia” realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de sistemas y Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid por Héctor Arnay, en mayo del 2014, donde realiza la evaluación de la incertidumbre de medida del ensayo aplicando el método de Monte Carlo para la propagación de las incertidumbres. El problema con este documento es que la evaluación se realizó con materiales

completamente distintos a los que se han utilizado en este caso por lo que no es factible utilizar estos datos de incertidumbre.

Finalmente se ha trabajado con lo recomendado por Eurolab en su documento “Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation”, donde se da la posibilidad de realizar una aproximación para el cálculo de la incertidumbre de medida utilizando las desviaciones la desviación típica de reproducibilidad obtenida en un ejercicio de intercomparación como estimador de la incertidumbre de medida.

Para este caso se utilizaron los valores publicados en el documento “Intercomparación AQUIS-TUBO IMPEDANCIA_1 Informe Final Global” de la intercomparación en la que el laboratorio participo en junio del 2014 con el tubo de impedancia con el que se han realizado estas mediciones.

Reproducibilidad de intercomparación		
Frecuencia	Muestra A	Muestra B
100	0,044	0,022
125	0,052	0,020
160	0,048	0,028
200	0,042	0,027
250	0,032	0,016
315	0,048	0,031
400	0,064	0,035
500	0,062	0,039
630	0,043	0,045
800	0,048	0,059
1000	0,042	0,048
1250	0,033	0,040
1600	0,033	0,036
2000	0,027	0,029
2500	0,020	0,013
3150	0,012	0,017
4000	0,012	0,018
5000	0,013	0,013

Tabla 4.6-8 Reproducibilidad de intercomparación

4.6.6.1. Ladrillo Artesanal

Respecto al modelado de la medida, hay que tomar en cuenta que las mediciones se realizaron utilizando el tubo pequeño y el grande, y que la

combinación de los datos para obtener el resultado final la realiza el programa internamente, por lo que el cálculo de la incertidumbre se realizara con los valores promedio para cada ladrillo artesanal proporcionados por el programa.

- Tipo A

Para este caso se tomara la desviación típica de la media de los valores promedio de cada muestra de ladrillo artesanal.

- Tipo B

Para la incertidumbre tipo B se ha usado los valores de reproducibilidad de intercomparación de la muestra A por ser más altos y así representar la situación más extrema, se lo divide para 2 para cubrir el error que se presenta por el procesamiento interno del sistema pulse, tal cual lo recomienda documento de Eurolab “Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation”.

Frecuencia	Reproducibilidad intercomparación Muestra A	Incertidumbre Tipo B
100	0,044	0,022
125	0,052	0,026
160	0,048	0,024
200	0,042	0,021
250	0,032	0,016
315	0,048	0,024
400	0,064	0,032
500	0,062	0,031
630	0,043	0,0215
800	0,048	0,024
1000	0,042	0,021
1250	0,033	0,0165
1600	0,033	0,0165
2000	0,027	0,0135
2500	0,020	0,01
3150	0,012	0,006
4000	0,012	0,006
5000	0,013	0,0065

Tabla 4.6-9 Incertidumbre tipo B para el ladrillo artesanal

Ahora se aplica la ley de propagación de incertidumbres para calcular la incertidumbre de medida, considerando que estas no están interrelacionadas, y que

además el coeficiente de sensibilidad para la incertidumbre tipo B será 1, que se usara un intervalo de confianza del 95% con un $k=2$.

Incertidumbre Ladrillo Artesanal				
f [HZ]	Tipo A	Tipo B	u_c	U
100	0,005	0,02	0,02	0,05
125	0,006	0,03	0,03	0,05
160	0,006	0,02	0,02	0,05
200	0,005	0,02	0,02	0,04
250	0,005	0,02	0,02	0,03
315	0,006	0,02	0,02	0,05
400	0,007	0,03	0,03	0,07
500	0,005	0,03	0,03	0,06
630	0,006	0,02	0,02	0,04
800	0,006	0,02	0,02	0,05
1000	0,006	0,02	0,02	0,04
1250	0,005	0,02	0,02	0,03
1600	0,004	0,02	0,02	0,03
2000	0,005	0,01	0,01	0,03
2500	0,005	0,01	0,01	0,02
3150	0,005	0,01	0,01	0,02
4000	0,006	0,01	0,01	0,02
5000	0,008	0,01	0,01	0,02

Tabla 4.6-10 Incertidumbre Ladrillo Artesanal

4.7. Análisis comparativo

En este punto se analizara un análisis comparando ambas técnicas de medición utilizadas para poder comprender sus limitaciones. También se analizara las diferentes características medidas según el tipo de ladrillo.

4.7.1. Tubo de impedancia vs sonda de impedancia

Como se puede observar en general los valores obtenidos para la sonda de impedancia son superiores a los obtenidos con el tubo de impedancia.

Analizando las muestras 01 y 02 de ladrillo artesanal, se puede notar claramente que al rodear la muestra con material absorbente para realizar la medición del coeficiente de absorción, los resultados que se obtienen se ven influenciados por esta situación, sobre todo en el área de alta frecuencia. También se nota la presencia de valores negativos, esto se debe a la influencia del medio, el lugar de medición.

Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal		
f [HZ]	Tubo de impedancia	Sonda de impedancia
100	0,048	0,287
125	0,033	0,125
160	0,048	0,100
200	0,045	0,085
250	0,047	0,119
315	0,049	0,230
400	0,051	0,359
500	0,056	0,410
630	0,063	0,419
800	0,066	0,386
1000	0,075	0,334
1250	0,081	0,285
1600	0,086	0,212
2000	0,082	0,096
2500	0,086	-0,026
3150	0,094	-0,176
4000	0,108	-0,280
5000	0,131	-0,411

Tabla 4.7-1 Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal 01

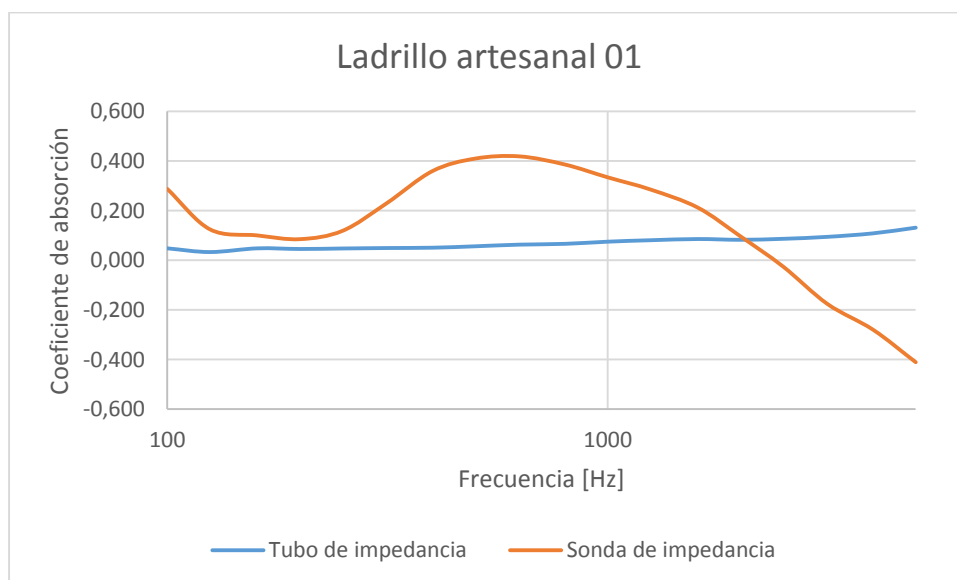


Figura 4.7-1 Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal 01

Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal 02		
f [HZ]	Tubo de impedancia	Sonda de impedancia
100	0,064	0,521
125	0,053	0,185
160	0,069	0,134
200	0,063	0,097
250	0,065	0,107
315	0,068	0,216
400	0,072	0,303
500	0,071	0,339
630	0,063	0,333
800	0,068	0,288
1000	0,074	0,233
1250	0,082	0,180
1600	0,078	0,132
2000	0,070	0,060
2500	0,072	-0,011
3150	0,080	-0,009
4000	0,095	0,045
5000	0,103	0,039

Tabla 4.7-2 Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal 02

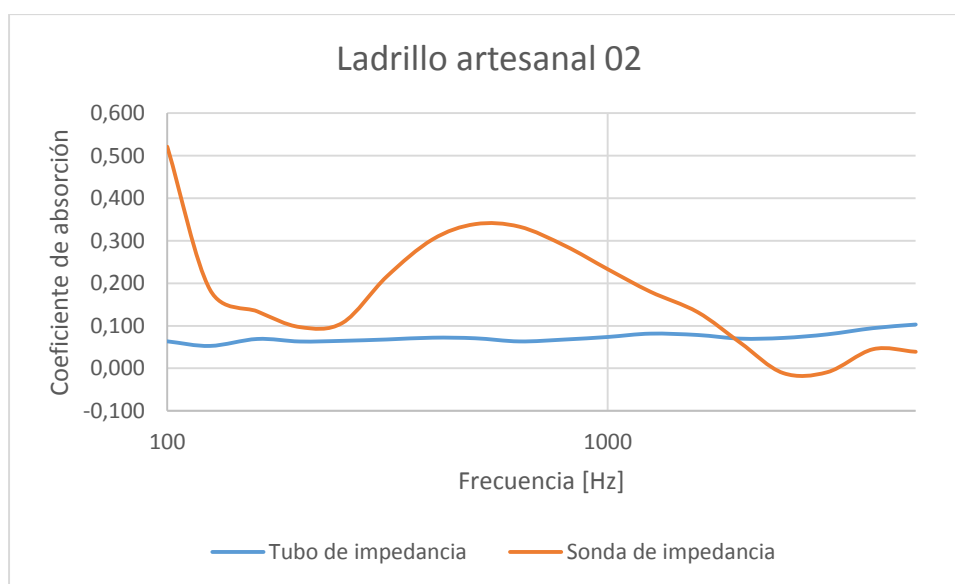


Figura 4.7-2 Comparativa método de medición - Ladrillo artesanal 02

En el caso del ladrillo industrial 01 en los valores obtenidos con la sonda de impedancia, se hace más evidente la influencia del medio que rodea a la muestra, presentando coeficientes de absorción más altos al estar rodeado de material absorbente. En general al igual que para el ladrillo artesanal, los valores obtenidos con el tubo de impedancia son más bajos y coherentes.

Comparativa método de medición - Ladrillo Industrial 01			
f [HZ]	Tubo de impedancia	Sonda de impedancia	
		con material absorbente	con material reflectante
100	0,021	0,457	0,383
125	0,008	0,142	0,234
160	0,025	0,097	0,193
200	0,020	0,109	0,123
250	0,022	0,118	0,098
315	0,023	0,238	0,122
400	0,024	0,372	0,129
500	0,028	0,436	0,123
630	0,029	0,442	0,159
800	0,028	0,387	0,180
1000	0,030	0,314	0,173
1250	0,029	0,247	0,224
1600	0,037	0,182	0,239
2000		0,094	0,251
2500		-0,015	0,147
3150		-0,146	-0,100
4000		-0,201	-0,695
5000		-0,058	-0,242

Tabla 4.7-3 Figura 4.7 3 Comparativa método de medición - Ladrillo Industrial 01

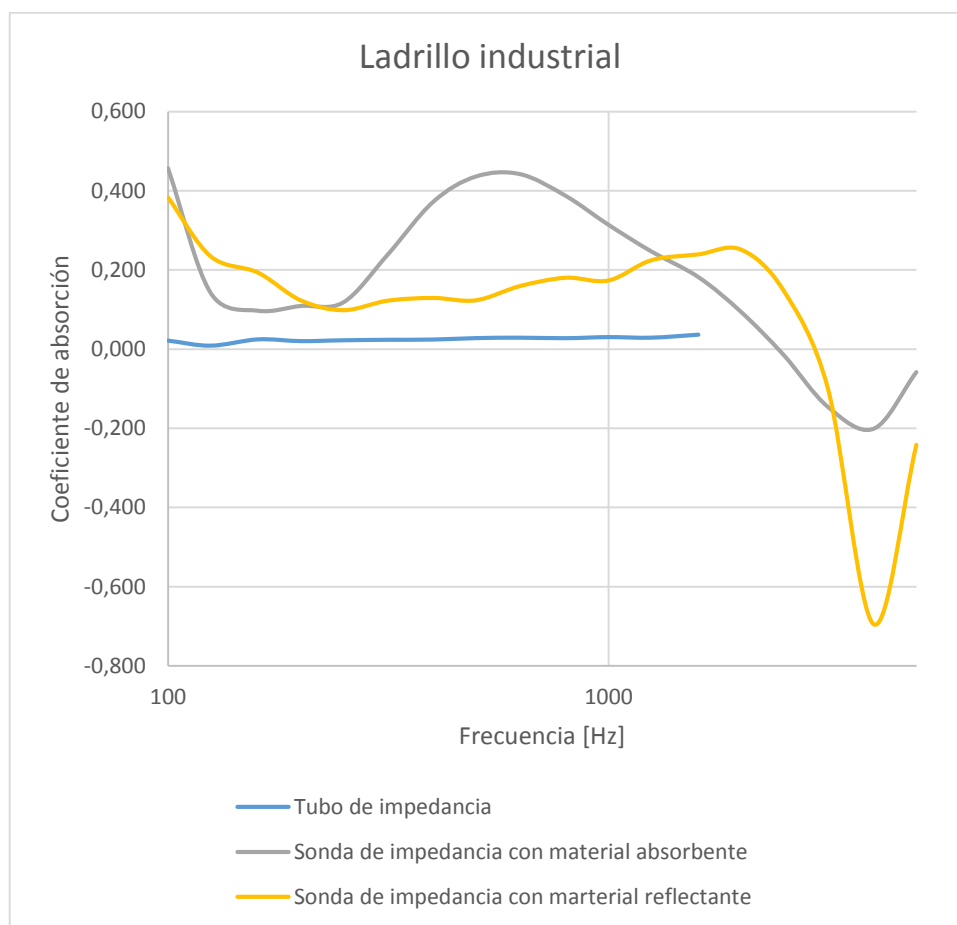


Figura 4.7-3 Comparativa método de medición - Ladrillo Industrial 01

4.7.2. Ladrillo artesanal vs ladrillo industrial

4.7.2.1. Densidad

Como se esperaba la densidad promedio del ladrillo artesanal es menor a la del ladrillo industrial, aun así se considere el tipo de aparejo y el uso de mortero el aumento de la densidad es lo suficientemente grande como para marcar diferencias importantes en cuanto al aislamiento

			$\rho[\text{kg/m}^3]$
Artesanal	Pie	Solo	1306
		Mortero 1	1366
		Mortero 2	1386
	1/2 Pie	Solo	1306
		Mortero 1	1366
		Mortero 2	1386
Industrial	Pie	Solo	1871
		Mortero 1	1874
		Mortero 2	1894
	1/2 Pie	Solo	1871
		Mortero 1	1874
		Mortero 2	1894

Tabla 4.7-4 Densidad muestras

Si se toman en cuenta los valores de la densidad para ladrillo macizo del catálogo de elementos constructivos, la densidad para el ecuatoriano es menor.

		Mortero 1
		$\rho=1900$ [kg/m³]
Ladrillo macizo	1/2 pie	2170
	1 pie	2140

Tabla 4.7-5 Valores de densidad Catálogo de elementos constructivos

4.7.2.2. Resistencia térmica

La conductividad térmica del ladrillo industrial 2 es ligeramente menor al primero, respecto a la resistencia térmica es bastante similar, comparando estos valores con los valores para el ladrillo macizo del catálogo de elementos constructivos, se puede ver que el ladrillo artesanal tiene una resistencia térmica superior a la del ladrillo macizo, en cambio el ladrillo industrial tiene una resistencia térmica bastante más baja.

Resistencia térmica	Ladrillo artesanal		Ladrillo Industrial		Fabrica - ladrillo macizo LM	
	2	3	1	2	1/2 pie	1 pie
m²K/W	0,28	0,34	0,06	0,07	0,12	0,17

Tabla 4.7-6 Comparativa resistencia térmica

4.7.2.3. Coeficiente de absorción

Por su estructura más porosa el ladrillo artesanal presenta coeficientes de absorción más altos.

Coeficiente de absorción		
f [HZ]	Artesanal	Industrial 02
100	0,058	0,020
125	0,045	0,014
160	0,059	0,022
200	0,055	0,021
250	0,054	0,023
315	0,056	0,024
400	0,058	0,024
500	0,061	0,025
630	0,057	0,028
800	0,061	0,034
1000	0,068	0,034
1250	0,076	0,037
1600	0,078	0,043
2000	0,073	0,042
2500	0,076	0,040
3150	0,084	0,048
4000	0,098	0,060
5000	0,116	0,065

Tabla 4.7-7 Comparativa coeficiente de absorción por tipo de muestra

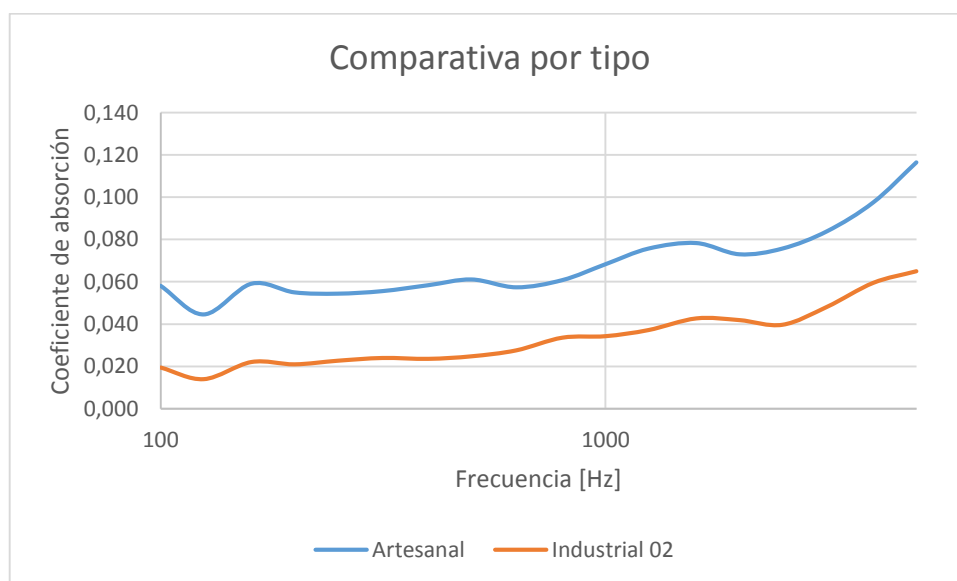


Figura 4.7-4 Comparativa coeficiente de absorción por tipo de muestra

En el catálogo de elementos constructivos se presentan los valores coeficiente de absorción para ladrillo cerámico visto, se presenta para 3 bandas de octava 500Hz, 1000Hz y 2000Hz y un valor medio. Se puede observar que estos valores comparados con los del ladrillo artesanal son más bajos, en cambio comparándolos con los valores del ladrillo industrial son más altos.

Coeficiente de absorción			
Frecuencia	Artesanal	Industrial	Catalogo
500	0,06	0,02	0,03
1000	0,07	0,03	0,04
2000	0,08	0,04	0,05
α_m	0,07	0,03	0,04

Tabla 4.7-8 Comparativa coeficiente de absorción

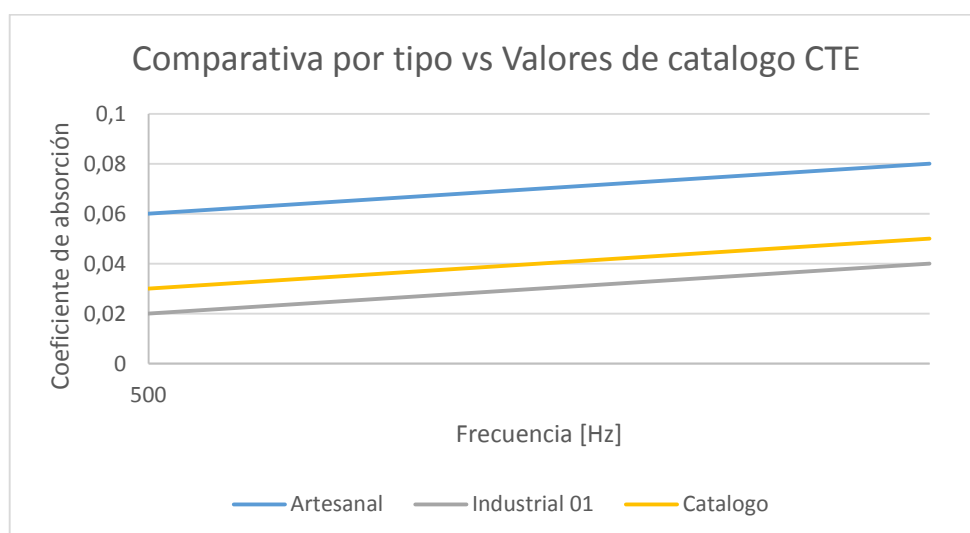


Figura 4.7-5 Comparativa coeficiente de absorción

4.7.2.1. Índice de Reducción sonora

En el cálculo del índice de reducción sonora se puede observar la influencia de la forma como se realiza el aparejo sobre la frecuencia crítica y su caída en la banda correspondiente, siendo más alta pero menos profunda para el aparejo de $\frac{1}{2}$ pie, tanto para el ladrillo artesanal como para el industrial.

Índice de reducción sonora - Ladrillo artesanal por tipo de aparejo		
Frecuencia	1 Pie	1/2 Pie
100	41,6	41,6
125	43,5	43,5
160	45,7	45,7
200	19,9	47,6
250	28,1	49,5
315	31,2	23,6
400	34,3	32,1
500	37,2	35,0
630	40,2	38,0
800	43,3	41,1
1000	46,2	44,0
1250	49,1	47,0
1600	52,3	50,2
2000	55,2	53,1
2500	58,1	56,0
3150	61,2	59,0
4000	64,3	62,1
5000	67,2	65,0

Tabla 4.7-9 Índice de reducción sonora - Ladrillo artesanal por tipo de aparejo

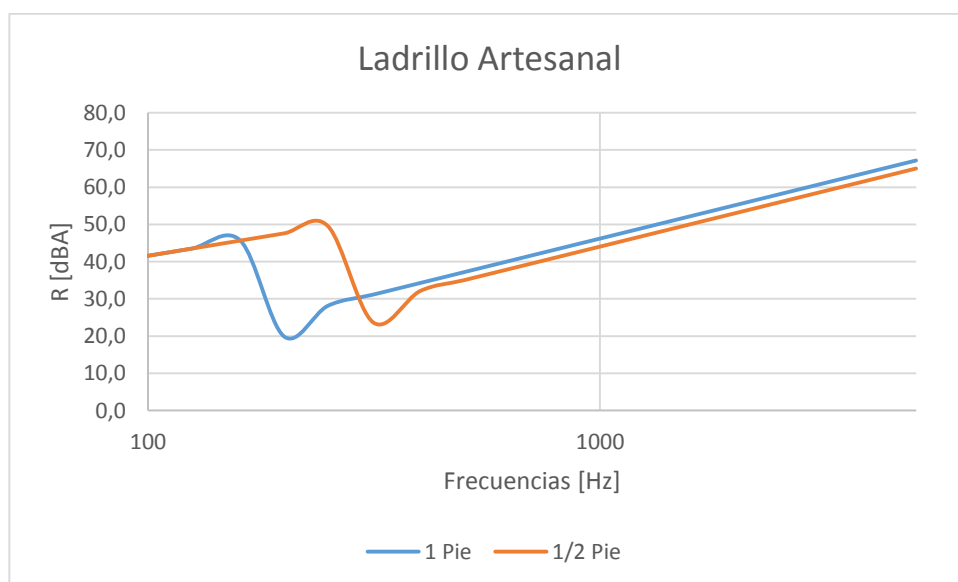


Figura 4.7-6 Índice de reducción sonora - Ladrillo artesanal por tipo de aparejo

Índice de reducción sonora - Ladrillo industrial por tipo de aparejo		
Frecuencia	1 Pie	1/2 Pie
100	42,6	42,6
125	44,5	44,5
160	46,7	46,7
200	48,6	48,6
250	23,0	50,6
315	26,6	52,6
400	31,7	54,6
500	35,7	56,6
630	39,4	31,1
800	43,0	35,2
1000	46,2	39,8
1250	49,4	43,8
1600	52,8	47,7
2000	55,9	51,1
2500	58,9	54,3
3150	62,0	57,6
4000	65,2	60,9
5000	68,1	63,9

Tabla 4.7-10 Índice de reducción sonora - Ladrillo industrial por tipo de aparejo

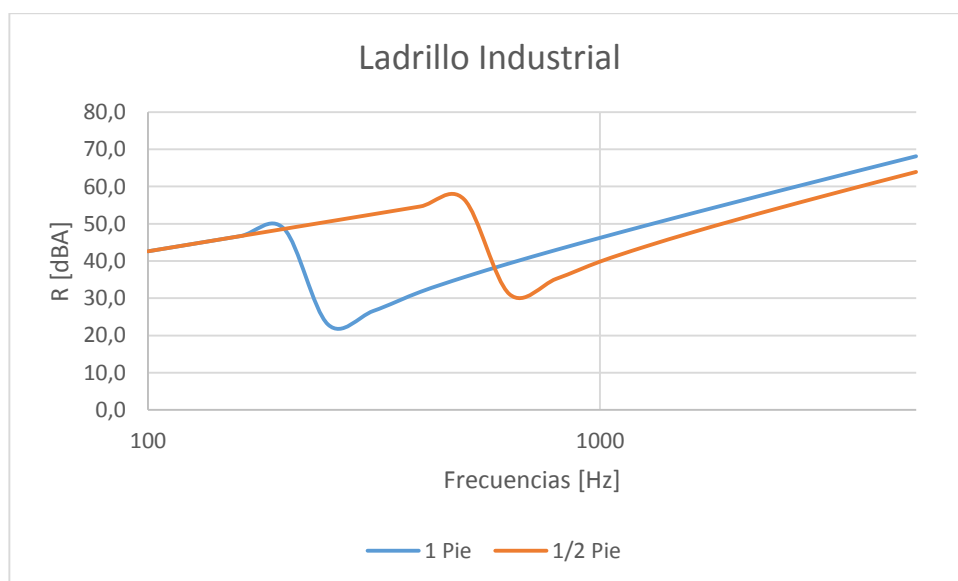


Figura 4.7-7 Índice de reducción sonora - Ladrillo industrial por tipo de aparejo

También se puede observar la variación del índice de reducción sonora, siendo el ladrillo industrial el que presenta una zona controlada por la masa más amplia que el ladrillo artesanal, así mismo sus frecuencias críticas son más altas.

Índice de reducción sonora - Ladrillo 1 pie		
Frecuencia	Artesanal	Industrial
100	41,6	42,6
125	43,5	44,5
160	45,7	46,7
200	19,9	48,6
250	28,1	23,0
315	31,2	26,6
400	34,3	31,7
500	37,2	35,7
630	40,2	39,4
800	43,3	43,0
1000	46,2	46,2
1250	49,1	49,4
1600	52,3	52,8
2000	55,2	55,9
2500	58,1	58,9
3150	61,2	62,0
4000	64,3	65,2
5000	67,2	68,1

Tabla 4.7-11 Índice de reducción sonora - Ladrillo 1 pie

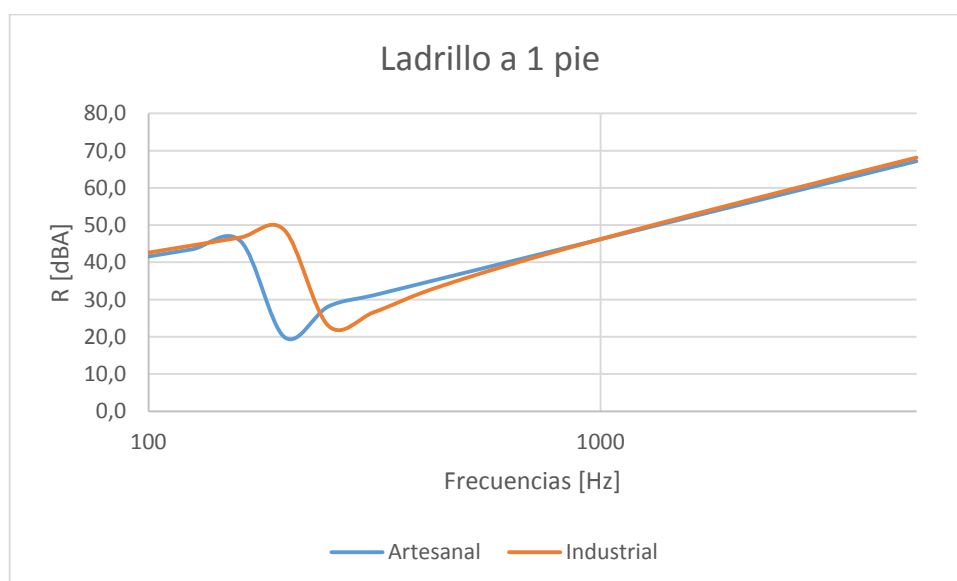


Figura 4.7-8 Índice de reducción sonora - Ladrillo 1 pie

Índice de reducción sonora - Ladrillo 1/2 pie		
Frecuencia	Artesanal	Industrial
100	41,6	42,6
125	43,5	44,5
160	45,7	46,7
200	47,6	48,6
250	49,5	50,6
315	23,6	52,6
400	32,1	54,6
500	35,0	56,6
630	38,0	31,1
800	41,1	35,2
1000	44,0	39,8
1250	47,0	43,8
1600	50,2	47,7
2000	53,1	51,1
2500	56,0	54,3
3150	59,0	57,6
4000	62,1	60,9
5000	65,0	63,9

Tabla 4.7-12 Índice de reducción sonora - Ladrillo 1 pie

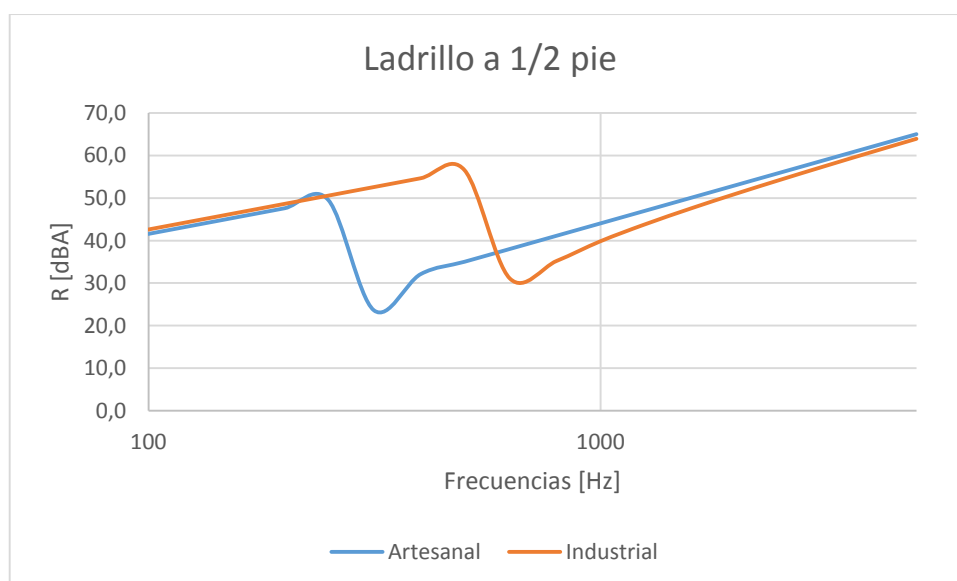


Figura 4.7-9 Índice de reducción sonora - Ladrillo 1/2 pie

5 Conclusiones

5.1. Conclusiones

- Todo este estudio ha servido como una familiarización con las técnicas de medición y sus limitaciones, además del aprendizaje sobre uso de equipamiento y software diverso como son la sonda de impedancia y el sistema pulse, además del conocimiento y manejo de normativa.
- El método de la sonda de impedancia no presenta buenos resultados para muestras pequeñas, y sus resultados se ven severamente afectados por las condiciones del medio que rodea a la muestra.
- La incertidumbre de medida para el caso del coeficiente de absorción medido en el tubo de impedancia tiene la misma magnitud que la medida que se ha realizado
- Si bien se logró traer las muestras, el sistema sigue siendo ineficiente, ya que solo se pueden traer paquetes de 4kg, si bien no hay límite en el número de paquetes, esto limita el peso de las muestras restringiendo la posibilidad de traer las más grandes. Otro inconveniente del sistema es el tiempo ya que los paquetes toman entre 7 y 10 días en llegar.
- Durante la evaluación de las dimensiones y volumen de los ladrillos se pudo confirmar las carencias en cuanto a control de calidad ya que tanto para el ladrillo artesanal como para el ladrillo industrial hubo variaciones importantes en cuanto a sus dimensiones.
- Otro detalle importante también fue la variación respecto a su calidad ya que en el caso del ladrillo artesanal cada uno tenía un color y una consistencia distinta y al momento de corte reaccionaron diferente. Respecto a los ladrillos industriales también hubo variaciones en su calidad, ya que uno de ellos presentó una dureza superior que impidió que se lo pudiera cortar para realizar una evaluación completa, según el colaborador en Ecuador existe la probabilidad de que esa remesa de ladrillos haya sido fabricada con material reciclado, ocasionando las betas metálicas en su parte central.

- Si bien el ladrillo artesanal es considerablemente menos denso que el ladrillo industrial, la diferencia no es suficiente como para que haya variaciones significativas en cuanto al aislamiento que presentarían teóricamente, ahora si los comparamos con respecto a los datos para el ladrillo macizo del catálogo de elementos constructivos, el ladrillo artesanal es bastante menos denso que el ladrillo español.
- La resistencia térmica presentada por el ladrillo artesanal resulta estar por encima del dato proporcionado por el catálogo de elementos constructivos, en cambio el ladrillo industrial presenta valores bastante menores.
- Los coeficientes de absorción del ladrillo artesanal resultaron superiores a los del ladrillo industrial y a los del ladrillo macizo del catálogo de la edificación, esto se debe a que presenta caras porosas y con imperfecciones, en cambio los coeficientes de absorción del ladrillo industrial resultaron ser los más bajos, este tiene caras más lisas y con menos imperfecciones.
- La forma como se hace el aparejo influye poco en el aislamiento de la partición por debajo de la frecuencia crítica ya que la masa por unidad de superficie se es la misma, comprobándose el principio de la ley de la masa que indica que para obtener un aumento significativo del aislamiento se debe al menos duplicar la masa por unidad de superficie.
- Al observar los valores del índice global de reducción acústica, cuando se tienen materiales con valores de densidad similares, su aislamiento va a ser similar, se requieren valores realmente diferentes (el doble) como para que exista una mejora.

6

Referencias

6.1. Referencias bibliográficas

- [1] F. Flores, M. Pérez, “Sistemas tradicionales de construcción” pp 75-79, Quito – Ecuador. Febrero 1984.
- [2] http://www.proyectosalohogar.com/el_porque_de_las_cosas/historia_del_ladrillo.htm
- [3] <http://es.wikipedia.org/wiki/Ladrillo>
- [4] http://es.wikipedia.org/wiki/Aparejo_%28construcci%C3%B3n%29
- [5] Norma CPE 005-4 (1984) Código ecuatoriano de la construcción. Mampostería de ladrillo pp.3.
- [6] Norma NTE INEN 0293 (1978); Ladrillos cerámicos. Definiciones. Clasificación y condiciones generales, pp.2.
- [7] Norma NTE INEN 0297 (1978); Ladrillos cerámicos. Requisitos, pp.2.
- [8] Norma NTE INEN 0317 (1978); Coordinación modular de la construcción. Dimensiones modulares de Ladrillos cerámicos.
- [9] Norma NTE INEN 0607 (1981); Coordinación modular de la construcción. Dimensiones modulares de Ladrillos cerámicos, pp.1.
- [10] Deleg N. “Definición de un proceso de producción semi-industrial de ladrillos en la parroquia de Susudel” pp18-40. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. 2010.
- [11] Guillén H. Semper G. “Análisis de la factibilidad para la implementación de una fábrica de ladrillos para la construcción” pp. 4-34 Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- [12] Ordoñez M., Sinchi B. (2010) “Plan de negocios para talleres de ladrillo artesanal en la parroquia de Sinincay sector Sigcho” pp 46-63. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. 2010.
- [13] Vazques N. “Proyecto para la producción y comercialización de ladrillo prensado en Quito y los Valles”. pp 70-79 Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador, 2003.

-
- [14] Norma UNE-EN 12667 (julio 2002) Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Pp. 9-17.
- [15] Netzsch (2013) "Operating Instructions HFM 436/3 Lambda" cap. 4 Berlin – Alemania.
- [16] Tijs E. (2013) "Study And Development Of An In Situ Acoustic Absorption Measurement Method" pp 11-12, 19-21; 32-35, 67-73; 121-128. Enschede – Holanda.
- [17] Microflown Technologies "Impedance Setup" (2013) Arnhem – Holanda.
- [18] Microflown Technologies "Impedance 3.1" (2013) Arnhem – Holanda.
- [19] Norma UNE-EN ISO 10534-2 (julio 2002) "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia, Parte 2: Método de la función de transferencia" pp 7-18.
- [20] Sommerhoff j. "Apuntes de Acústica de locales" Universidad Austral de Chile pp.5-7 2005.
- [21] Long M. "Architectural Acoustics" pp.319-330, Elsevier Academic, Press Burlington – USA:. 2006
- [22] Fahy F. "Engineering Acoustics" pp.323-325, Elsevier Academic Press California – USA. 2005.
- [23] Diaz C. "Aislamiento acustico II" Instituto Juan Herrera de la Escuela de Arquitectura de Madrid. 2011.
- [24] Gil C. "Apuntes de aislamiento de paredes simples" Universidad Politécnica de Madrid (2014).
- [25] C. Harriis "Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido" pp: 31.6-31.9 McGraw-Hill, 1998.
- [26] Isover "Manual de aislamiento en la industria" pp.112-115.
- [27] https://courses.physics.illinois.edu/phys193/labs/octave_bands.pdf
- [28] T. Vigram "Building acoustics" pp:93 Taylor & Francis New York – USA.

-
- [29] C. Hopkins "Sound Insulation" pp. 608, Elsevier Academic Press, Burlington – USA
- [30] JCGM "Evaluación de datos de medición – Guía para la expresión de la incertidumbre de medida" pp. 1-17
- [31] H. Arnay "Estudio de la precisión en la determinación del coeficiente de absorción acústica en tubo de impedancia" pp.52-54 Universidad Politécnica de Madrid, Mayo 2014.
- [32] Pedrero A. "Apuntes de técnicas de medición – introducción a la estimación de medida" 2014.
- [33] NBE-CA-88 (1988) "Norma básica de la edificación – Condiciones acústicas en los edificios" pp 33.
- [34] European Federation of national Associations of Measurement, Testing and Analytical Laboratories "Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation" pp17, 2007.
- [35] Centro Español de metrología "Evaluación de datos de medición: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida" pp: 11,12-14,24-27, 2009.
- [36] J. Blauert, y N. Xiang "Acoustics for Engineers" pp 99, 181-182, Springer 2009.
- [37] C. Carrillo "Comparación de la Respuesta Sísmica Incorporando y Desacoplando la Mampostería y Técnicas de reforzamiento", Escuela Politécnica del Ejército pp 32 Sangolqui – Ecuador 2008.
- [38] Catálogo De Elementos Constructivos Del CTE, 3.17.1 pp 26, 2010

Anexos

Anexo 1

Otros parámetros obtenidos

De las mediciones con el tubo de impedancia se obtuvieron también resultados del coeficiente de reflexión acústica y de la impedancia acústica.

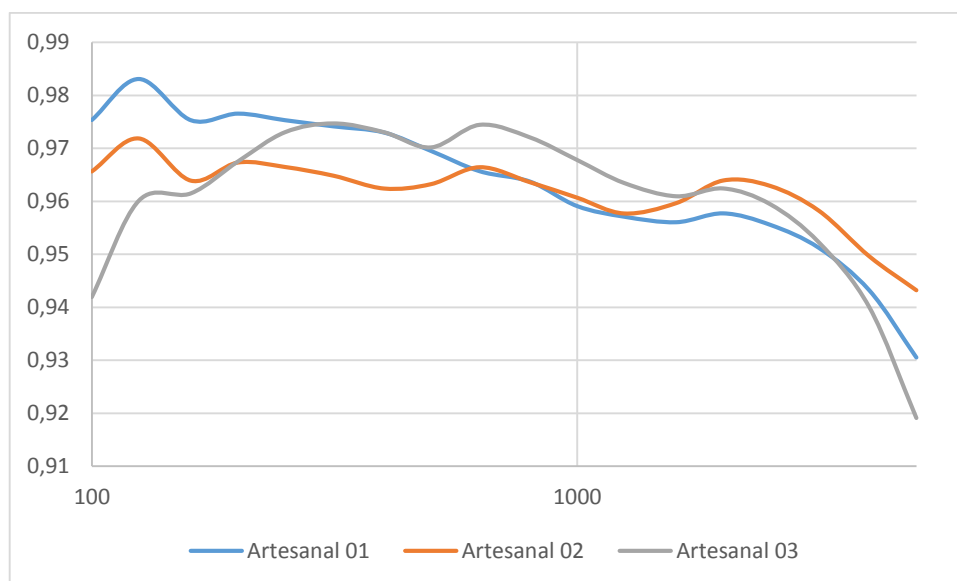
Coeficiente de reflexión acústica

El coeficiente de reflexión cuantifica la cantidad de energía que ha sido absorbida por la partición, se relaciona con el coeficiente de absorción es:

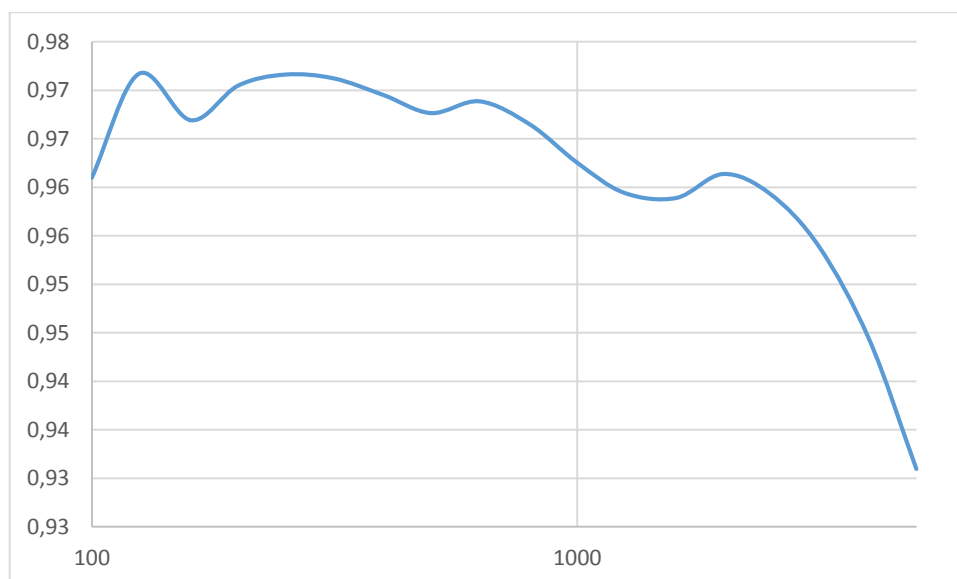
- Resultados Ladrillo artesanal

Las diferencias en la calidad de las muestras se hacen evidentes también en los valores del coeficiente de reflexión acústica, aun si todos muestran una tendencia similar.

Resultados - Coeficiente de reflexión acústica - Ladrillo artesanal				
Frecuencia	Artesanal 01	Artesanal 02	Artesanal 03	Artesanal promedio
100	0,98	0,97	0,94	0,96
125	0,98	0,97	0,96	0,97
160	0,98	0,96	0,96	0,97
200	0,98	0,97	0,97	0,97
250	0,98	0,97	0,97	0,97
315	0,97	0,96	0,97	0,97
400	0,97	0,96	0,97	0,97
500	0,97	0,96	0,97	0,97
630	0,97	0,97	0,97	0,97
800	0,96	0,96	0,97	0,97
1000	0,96	0,96	0,97	0,96
1250	0,96	0,96	0,96	0,96
1600	0,96	0,96	0,96	0,96
2000	0,96	0,96	0,96	0,96
2500	0,96	0,96	0,96	0,96
3150	0,95	0,96	0,95	0,95
4000	0,94	0,95	0,94	0,94
5000	0,93	0,94	0,92	0,93



Resultados - Coeficiente de reflexión acústica - Ladrillo artesanal

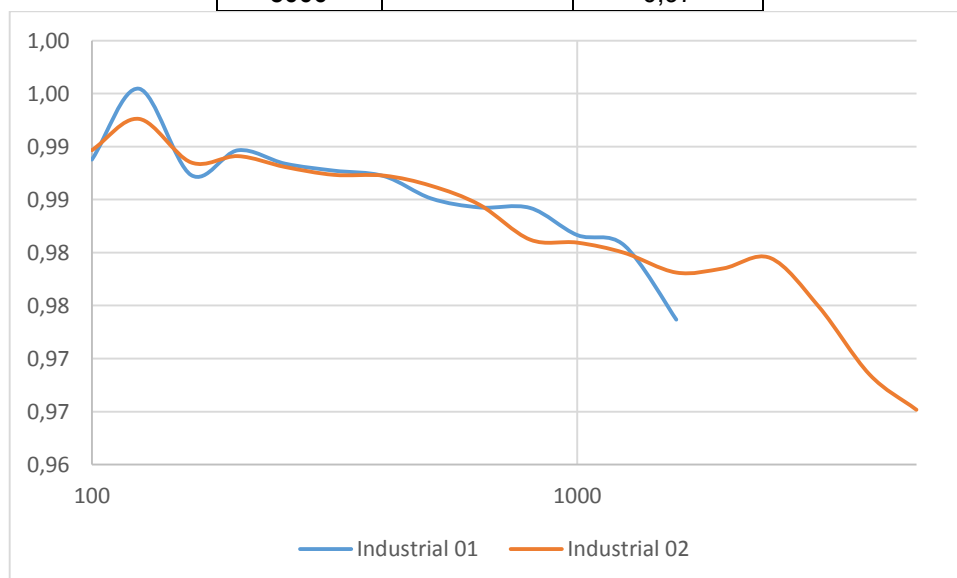


Coeficiente de reflexión acústica - Ladrillo artesanal

- Resultados Ladrillo industrial

Ambas muestras presentan una tendencia similar, con las claras diferencias respecto a su calidad.

Resultados - Coeficiente de reflexión acústica - Ladrillo industrial		
Frecuencia	Industrial 01	Industrial 02
100	0,99	0,99
125	1,00	0,99
160	0,99	0,99
200	0,99	0,99
250	0,99	0,99
315	0,99	0,99
400	0,99	0,99
500	0,99	0,99
630	0,98	0,98
800	0,98	0,98
1000	0,98	0,98
1250	0,98	0,98
1600	0,97	0,98
2000		0,98
2500		0,98
3150		0,97
4000		0,97
5000		0,97



Resultados - Coeficiente de reflexión acústica - Ladrillo industrial

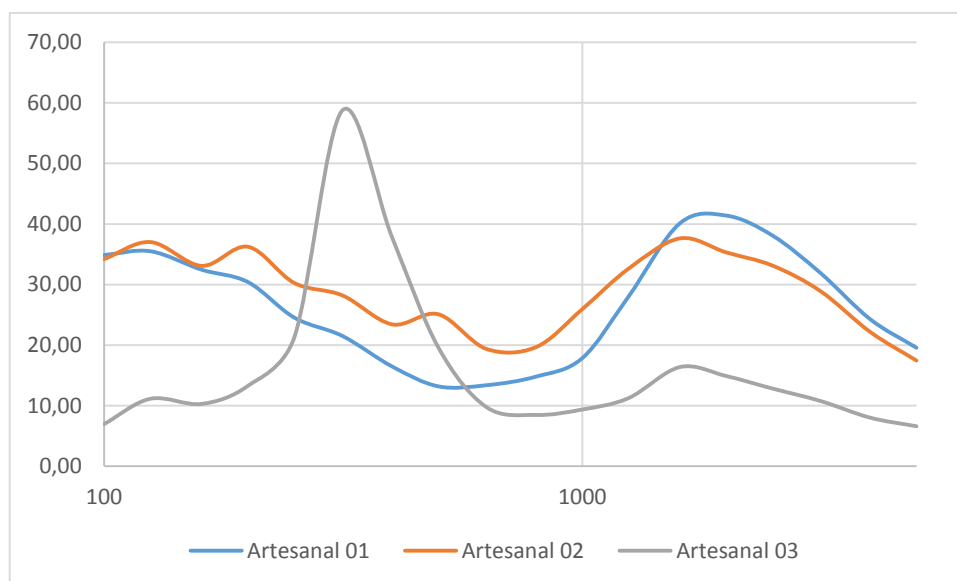
Impedancia acústica

La impedancia acústica es la oposición que pone el material al paso de las ondas, es una característica intrínseca del material, se compone de una parte real (resistiva) y una parte imaginara (reactiva), para realizar una comparación solo se ha tomado en cuenta la parte real.

- Resultados Ladrillo artesanal

La forma en la que se opone cada muestra al paso de las ondas difiere sobre todo en el caso de la muestra de ladrillo artesanal 03, que presenta un pico en la banda de 315 Hz.

Resultados - Impedancia acústica - Ladrillo artesanal			
Frecuencia	Artesanal 01	Artesanal 02	Artesanal 03
100	34,88	34,21	6,97
125	35,51	37,02	11,15
160	32,46	33,10	10,30
200	30,41	36,25	13,30
250	24,54	30,26	21,31
315	21,53	28,22	58,75
400	16,50	23,44	37,86
500	13,20	25,10	19,64
630	13,39	19,39	9,79
800	14,80	19,67	8,48
1000	17,85	25,95	9,38
1250	28,04	32,63	11,26
1600	40,11	37,63	16,39
2000	41,40	35,32	14,91
2500	38,10	33,14	12,84
3150	31,91	28,92	10,79
4000	24,30	22,20	8,03
5000	19,58	17,46	6,62

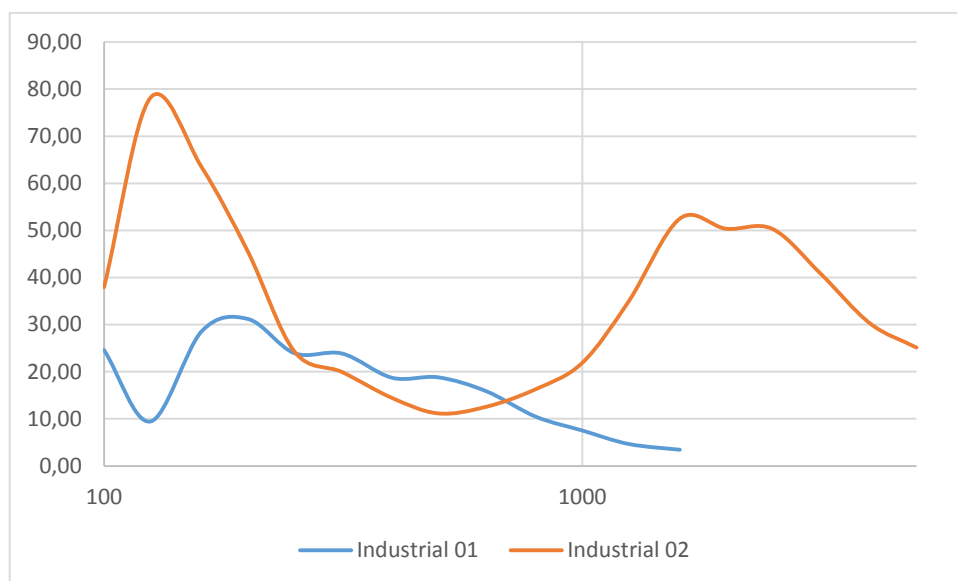


Resultados - Impedancia acústica - Ladrillo artesanal

- Resultados Ladrillo industrial

El ladrillo industrial 02, presenta un pico en baja frecuencia en la banda de 125Hz, mientras que el ladrillo industrial 01 presenta una atenuación en esa misma frecuencia, esto denota claramente las diferencias respecto a su calidad.

Resultados - Impedancia acústica - Ladrillo industrial		
Frecuencia	Industrial 01	Industrial 02
100	24,60	37,95
125	9,44	78,15
160	28,58	63,41
200	31,19	45,45
250	23,93	24,31
315	23,84	19,91
400	18,72	14,44
500	18,81	11,15
630	15,86	12,56
800	10,45	16,31
1000	7,53	21,88
1250	4,67	34,89
1600	3,44	52,50
2000		50,35
2500		50,31
3150		40,85
4000		30,24
5000		25,13



Resultados - Impedancia acústica - Ladrillo industrial

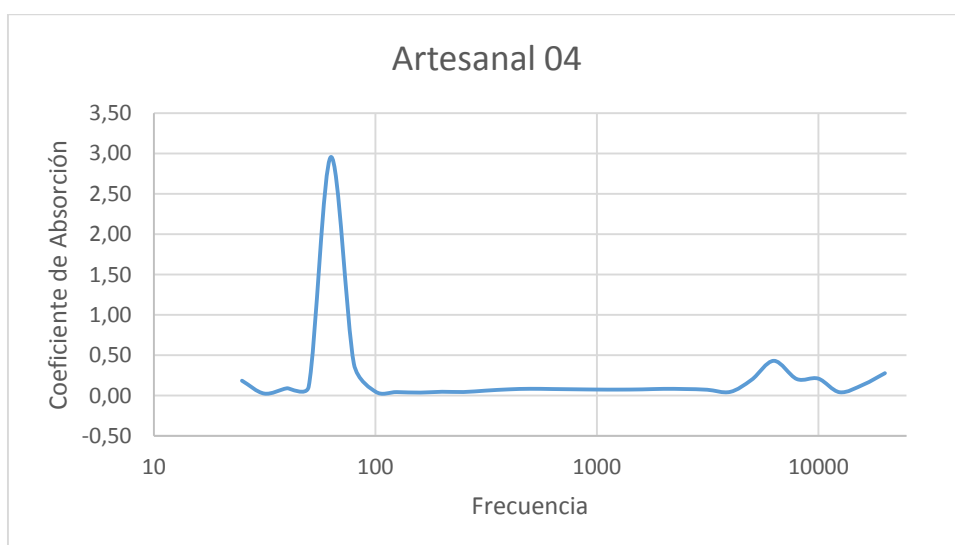
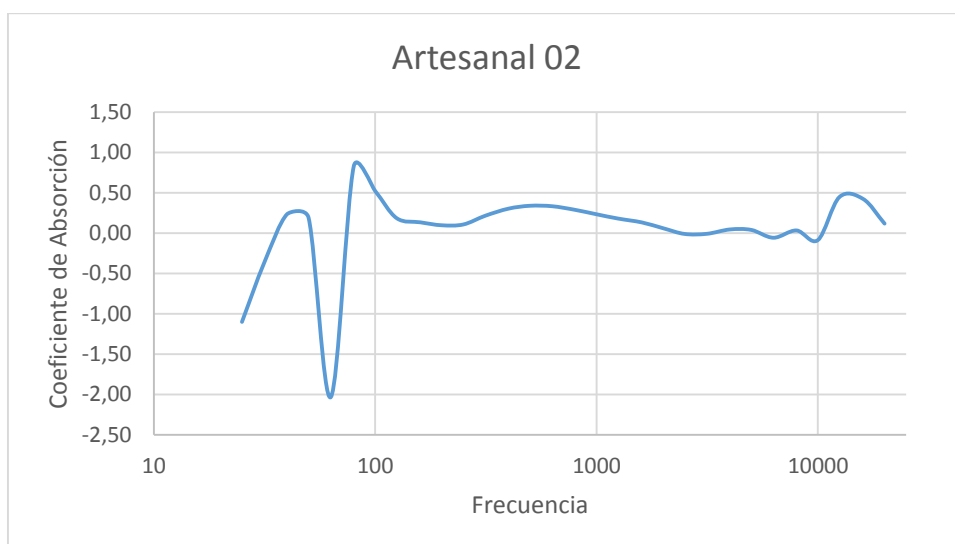
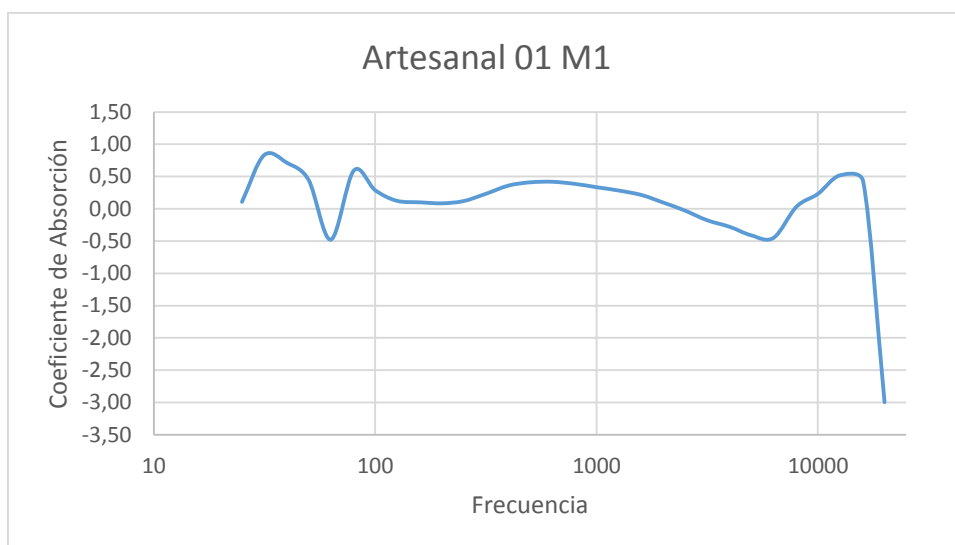
Anexo 2

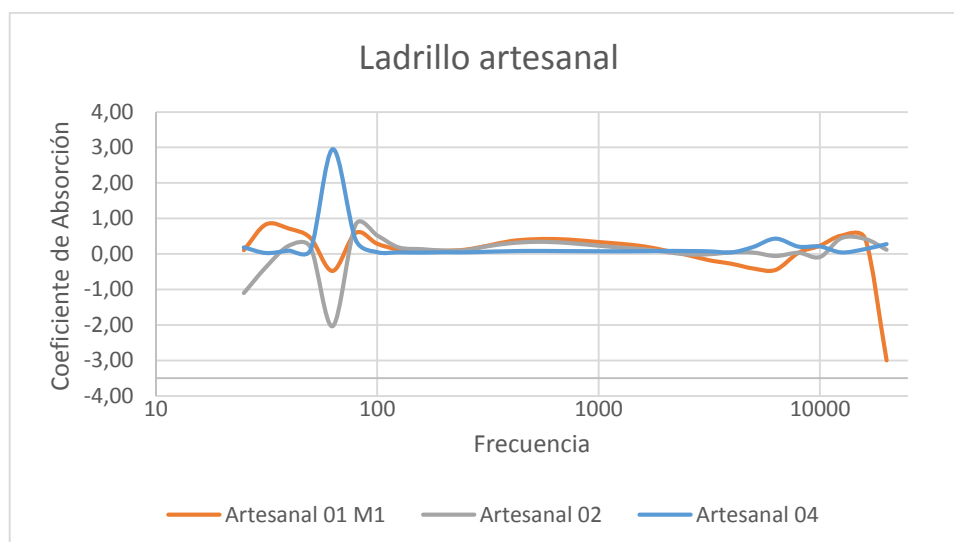
Coeficiente de absorción acústica en todo el rango de frecuencia

Sonda de impedancia:

- Ladrillo artesanal

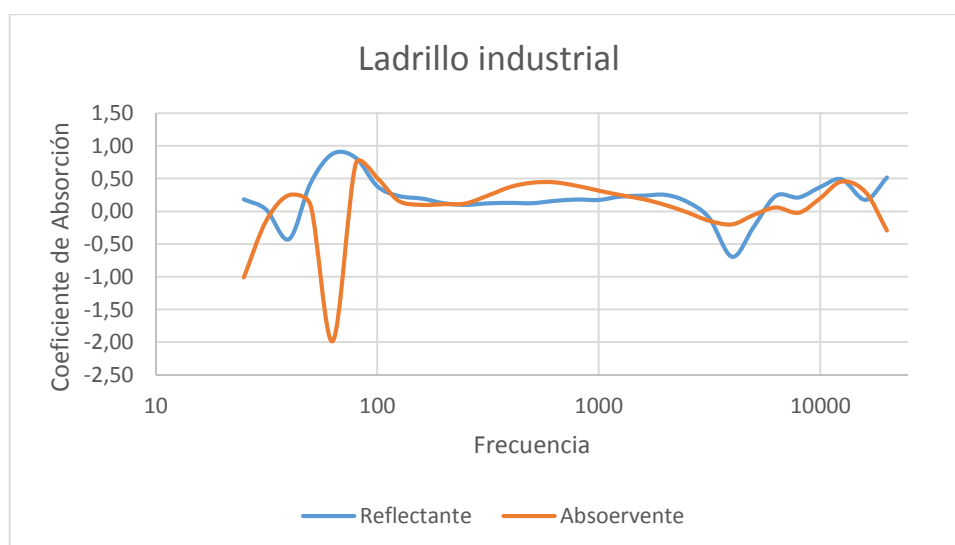
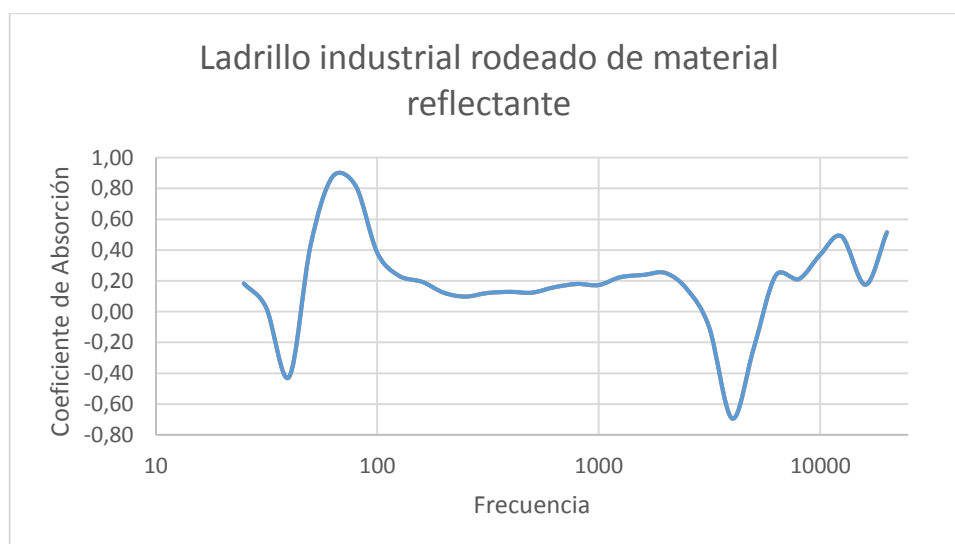
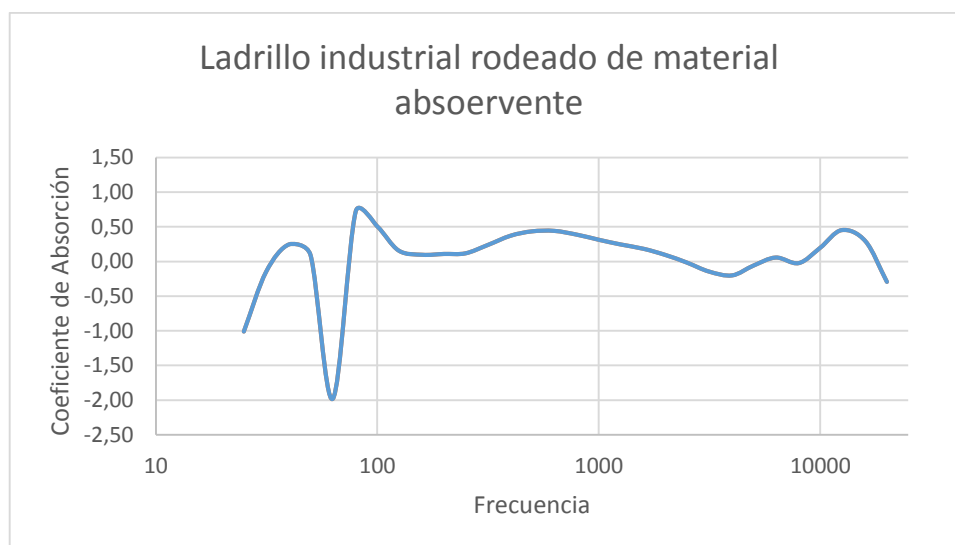
f[Hz]	Artesanal 01 M1	Artesanal 02	Artesanal 04
25	0,11	-1,10	0,18
31,5	0,83	-0,37	0,03
40	0,71	0,24	0,09
50	0,45	0,19	0,11
63	-0,48	-2,03	2,96
80	0,59	0,83	0,40
100	0,29	0,52	0,05
125	0,12	0,18	0,04
160	0,10	0,13	0,04
200	0,08	0,10	0,05
250	0,12	0,11	0,04
315	0,23	0,22	0,06
400	0,36	0,30	0,08
500	0,41	0,34	0,08
630	0,42	0,33	0,08
800	0,39	0,29	0,08
1000	0,33	0,23	0,08
1250	0,28	0,18	0,07
1600	0,21	0,13	0,08
2000	0,10	0,06	0,08
2500	-0,03	-0,01	0,08
3150	-0,18	-0,01	0,07
4000	-0,28	0,04	0,05
5000	-0,41	0,04	0,20
6300	-0,45	-0,06	0,43
8000	0,03	0,03	0,21
10000	0,23	-0,09	0,21
12500	0,52	0,45	0,04
16000	0,43	0,42	0,14
20000	-3,00	0,12	0,28





- Ladrillo industrial

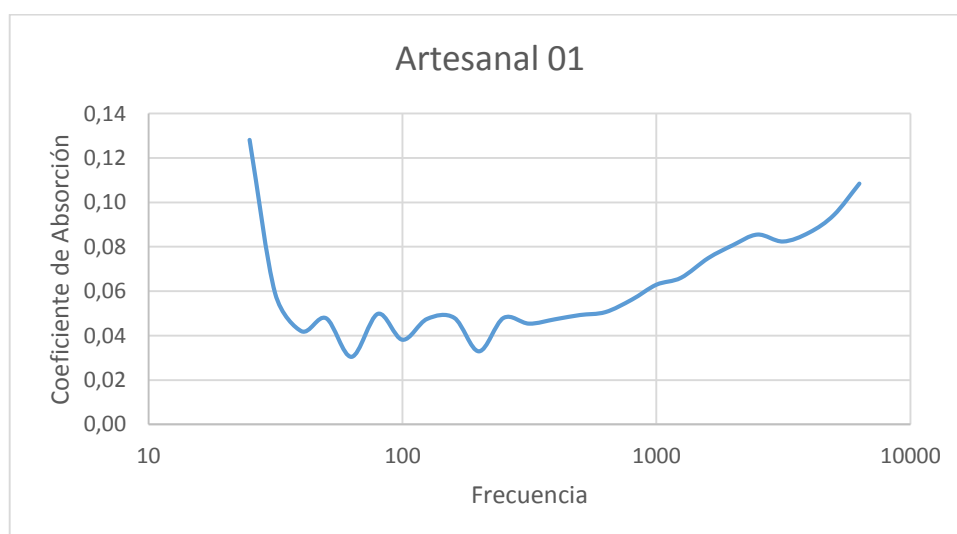
Industrial 01		
f[Hz]	Absorbente	Reflectante
25	-1,01	0,18
31,5	-0,15	0,03
40	0,25	-0,43
50	0,09	0,43
63	-1,98	0,88
80	0,72	0,82
100	0,51	0,38
125	0,16	0,23
160	0,10	0,19
200	0,11	0,12
250	0,12	0,10
315	0,24	0,12
400	0,37	0,13
500	0,44	0,12
630	0,44	0,16
800	0,39	0,18
1000	0,31	0,17
1250	0,25	0,22
1600	0,18	0,24
2000	0,09	0,25
2500	-0,02	0,15
3150	-0,15	-0,10
4000	-0,20	-0,69
5000	-0,06	-0,24
6300	0,06	0,24
8000	-0,02	0,21
10000	0,20	0,37
12500	0,45	0,49
16000	0,29	0,17
20000	-0,29	0,52

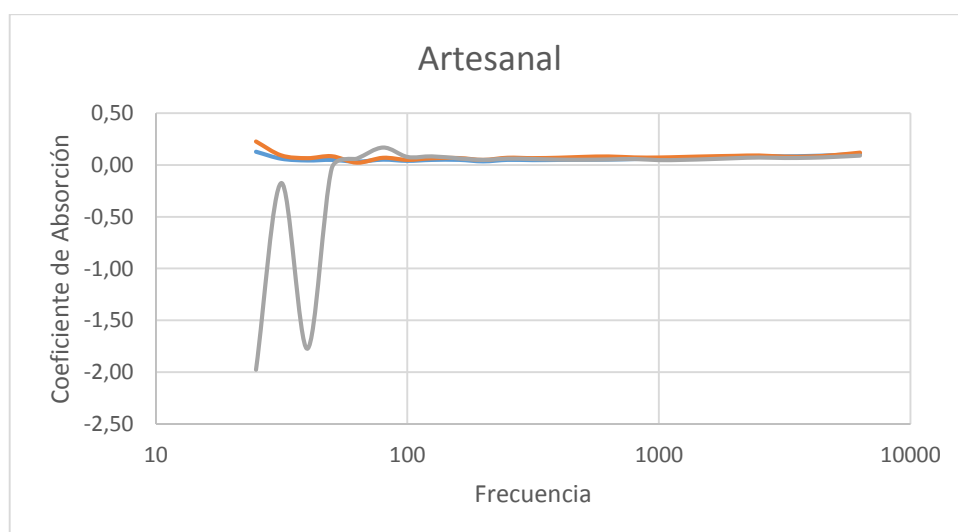
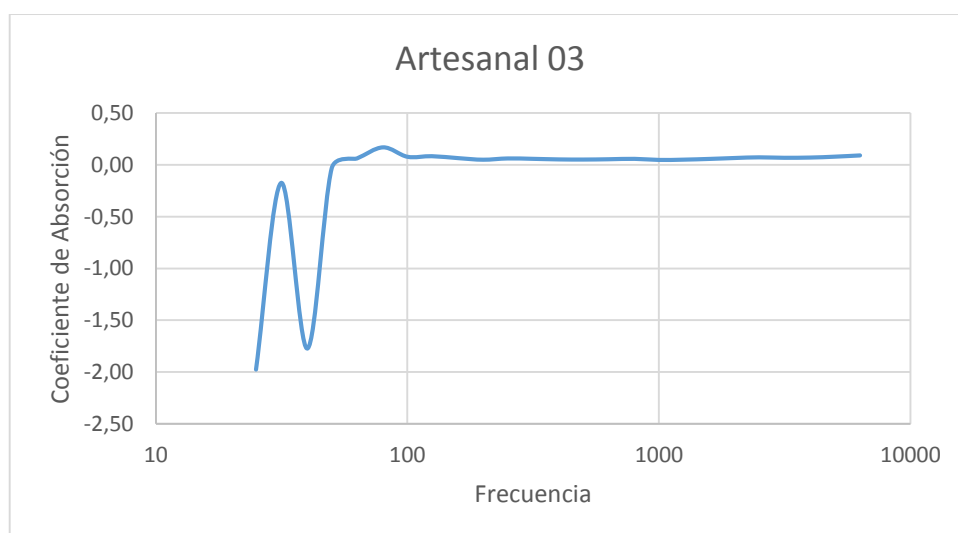
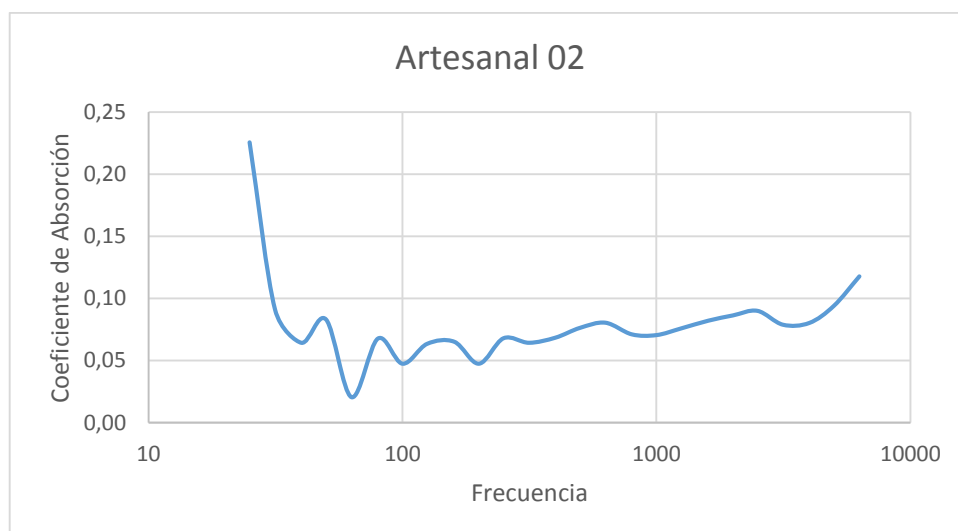


Tubo de impedancia:

- Ladrillo artesanal

f[Hz]	Artesanal 01	Artesanal 02	Artesanal 03
25	0,13	0,23	-1,98
31,5	0,06	0,09	-0,18
40	0,04	0,06	-1,77
50	0,05	0,08	-0,03
63	0,03	0,02	0,06
80	0,05	0,07	0,17
100	0,04	0,05	0,08
125	0,05	0,06	0,08
160	0,05	0,07	0,06
200	0,03	0,05	0,05
250	0,05	0,07	0,06
315	0,05	0,06	0,06
400	0,05	0,07	0,05
500	0,05	0,08	0,05
630	0,05	0,08	0,05
800	0,06	0,07	0,06
1000	0,06	0,07	0,05
1250	0,07	0,08	0,05
1600	0,07	0,08	0,06
2000	0,08	0,09	0,06
2500	0,09	0,09	0,07
3150	0,08	0,08	0,07
4000	0,09	0,08	0,07
5000	0,09	0,09	0,08
6300	0,11	0,12	0,09





- Ladrillo industrial

f[Hz]	Industrial 01	Industrial 02
25	0,38	0,13
31,5	0,08	0,04
40	0,02	0,01
50	0,02	0,04
63	-0,01	0,01
80	0,04	0,03
100	0,00	0,01
125	0,02	0,02
160	0,02	0,02
200	0,01	0,01
250	0,02	0,02
315	0,02	0,02
400	0,02	0,02
500	0,02	0,02
630	0,02	0,02
800	0,03	0,02
1000	0,03	0,03
1250	0,03	0,03
1600	0,03	0,03
2000		0,04
2500		0,04
3150		0,04
4000		0,04
5000		0,05
6300		0,06

